

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช



รายงานผลการวิจัย

การศึกษาผลการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิด
และพอลิคาโพรแลคโตนที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและ
ความสามารถในการต้านทานความชื้นของคอมพอสิตโฟมที่มี
แป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย
ผศ. ดร. รัตนา รุจิรวนิช

กุมภาพันธ์ 2547

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช



รายงานผลการวิจัย

การศึกษาผลการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิด
และพอลิคาโพรแลคโตนที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและ
ความสามารถในการต้านทานความชื้นของคอมพอสิตโฟมที่มี
แป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย
ผศ. ดร. รัตนา รุจิรวนิช

กุมภาพันธ์ 2547

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาผลของการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลโทนที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานความชื้นของคอมพอสิต โฟมที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก

ชื่อผู้วิจัย ดร. รัตนา รุจิรวนิช

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กุมภาพันธ์ 2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมคอมพอสิต โฟม โดยวิธีการอบจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ข่อยสลายได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิด และพอลิคาโพรแลโทน จากการศึกษาโดยใช้กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคป (Scanning electron microscope) พบว่าขอบบนและล่างของโฟมจะมีความหนาแน่นสูงในขณะที่ส่วนกลางของโฟมจะมีความหนาแน่นต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์เวลาในการเก็บโฟม การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ข่อยสลายได้และการเติมพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ค่าการทนต่อแรงดึง และค่าการทนต่อแรงโค้งงอจะให้ค่าสูงที่สุดที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 42 เปอร์เซ็นต์นาน 2 วัน และการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถปรับปรุงค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงโค้งงอและค่าการยึดตัวของโฟมได้ ในขณะที่การเติมพลาสติกไซเซอร์ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึง และค่าการทนต่อแรงโค้งงอของโฟมลดลงแต่เพิ่มการยึดตัวของโฟม นอกจากนี้การศึกษาศักยภาพการดูดซับน้ำ แสดงให้เห็นว่า การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ข่อยสลายได้สามารถลดการดูดซับน้ำของโฟมได้และจากการศึกษาการข่อยสลายด้วยเอนไซม์อะไมเลสพบว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์นี้มีผลน้อยมากต่อการข่อยสลายของแป้ง

Project Title	Preparation and Characterization of Starch-Based Composite Foams
Investigator	Asst. Dr. Ratana Rujiravanit
Year	2004



Abstract

Starch-based composite foams were prepared by baking a mixture of starch and a synthetic biodegradable polymer (i.e., poly(vinyl alcohol), poly(lactic acid), and poly(ϵ -caprolactone)) in a hot mold. This process can be used to prepare a thin walled object, such as a plate. Scanning electron micrographs of the cross-sectional view of the foams showed that the cellular size is very dense in the outer layer and less dense in the inner layer. The effect of relative humidity, storage time, the presence of synthetic biodegradable polymers, and the presence of plasticizers (i.e., glycerol, urea, and ammonium chloride) on tensile and flexural properties were investigated. For all formulations, the amount of relative humidity which gave the maximum value of the ultimate strength of the foams was 42%, while the storage time which gave the maximum value of the ultimate strength of the foams was 2 days (only tested for a fixed relative humidity of 42%).

Addition of the synthetic biodegradable polymers improved the ultimate strength and the elongation at break of the foams. Increasing the plasticizer contents increased the elongation at break at the expense of the ultimate strength. Water absorption and biodegradability of the foams were also studied. Increasing the synthetic biodegradable polymer contents increased the water resistivity of the foams. Enzymatic degradation tests showed that the foams were degraded by enzyme α -amylase.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 สารเติมแต่ง.....	13
3.1.4 เกลีสสำหรับควบคุมความชื้น.....	13
3.1.5 สารเคมี.....	13
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	14
3.2.1 เครื่อง Compression Molding.....	14
3.2.2 กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคป.....	14
3.2.3 เครื่อง Lloyd Tensile Tester.....	14
3.2 วิธีการทดลอง.....	14
3.2.1 การเตรียมคอมพอสิต โฟมที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก.....	14
3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของคอมพอสิต โฟม.....	14
3.2.2.1. โครงสร้างระดับจุลภาคของคอมพอสิต โฟม.....	14
3.2.2.2 การควบคุมปริมาณความชื้นในชิ้นงาน (Humidity Control).....	15
3.2.2.3. การวัดปริมาณความชื้น.....	15
3.2.2.4 การวัดปริมาณการดูดซับน้ำ.....	15
3.2.2.5 สมบัติเชิงกล.....	15
3.2.2.5.1 ความต้านทานต่อแรงดึง.....	15
3.2.2.5.2 ความต้านทานต่อแรงโค้งงอ.....	15
3.2.2.6 การศึกษาการย่อยสลายด้วยเอนไซม์.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	17
4.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอมพอสิต โฟม.....	17
4.2 ปริมาณความชื้นในคอมพอสิต โฟม.....	19
4.2.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟม.....	19
4.2.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟม.....	21
4.2.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟม.....	21
4.2.4 ผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟม.....	23
4.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต โฟม.....	24
4.3.1 สมบัติในการรับแรงดึง.....	25
4.3.1.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม.....	25
4.3.1.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม.....	28
4.3.1.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม.....	31
4.3.1.4 ผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม.....	32
4.3.2 สมบัติในการรับแรงโค้งงอ.....	34
4.3.2.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม.....	34
4.3.2.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	4.3.2.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม.....	40
	4.3.2.4 ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม	41
	4.4 สมบัติการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟม.....	43
	4.5 การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิต โฟม.....	43
5	ข้อสรุป.....	45
	ส่วนอ้างอิง.....	46
	ส่วนผนวก.....	49
	ส่วนผนวก ก. ปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟม.....	50
	ส่วนผนวก ข. ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม.....	57
	ส่วนผนวก ค. ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟม.....	65
	ส่วนผนวก ง. ค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม.....	73
	ส่วนผนวก จ. ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟม.....	81
	ส่วนผนวก ฉ. ค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟม.....	89
	ส่วนผนวก ช. ค่าการสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิต โฟม.....	89
	ส่วนผนวก ซ. ค่าความหนาแน่นของคอมพอสิต โฟม.....	90
	ส่วนผนวก ฅ. สิทธิบัตรเกี่ยวกับคอมพอสิต โฟม.....	91

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2545.....	8
3.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของน้ำเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	13
ก.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของโพมจากแป้ง.....	50
ก.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	50
ก.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	51
ก.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	51
ก.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	52
ก.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิคาโพรแลกโตน 10%.....	52
ก.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมแป้ง- พอลิคาโพรแลกโตน 30%.....	53
ก.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โพมจากแป้ง.....	53

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.9	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....54
ก.10	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....54
ก.11	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....55
ก.12	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....55
ก.13	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลกโตน 10%.....56
ก.14	ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลกโตน 30%.....56
ข.1	ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแป้ง.....57
ข.2	ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....57
ข.3	ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....58

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	58
ข.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	59
ข.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลก โทน 10%.....	59
ข.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลก โทน 30%.....	60
ข.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแข็ง.....	60
ข.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	61
ข.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	61
ข.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	62
ข.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	62

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 10%.....	63
ข.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 30%.....	63
ข.15 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีกลีเซอรอล.....	64
ข.16 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มียูเรีย.....	64
ข.17 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์.....	64
ค.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแป้ง.....	65
ค.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	65
ค.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	66
ค.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	66
ค.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	67
ค.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 10%.....	67

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7 ผลของความสัมพันธ์ต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 30%.....	68
ก.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแข็ง.....	68
ก.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	69
ก.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	69
ก.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	70
ก.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	70
ก.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 10%.....	71
ก.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลคโตน 30%.....	71
ก.15 ค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแข็งที่มีกลีเซอรอล.....	72
ก.16 ค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแข็งที่มียูเรีย.....	72
ก.17 ค่าการขีดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแข็งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์.....	72

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้ง.....	73
ง.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	73
ง.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	74
ง.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	74
ง.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	75
ง.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง พอลิคาโพรแลค โทน 10%.....	75
ง.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิคาโพรแลค โทน 30%.....	76
ง.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้ง.....	76
ง.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	77
ง.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแป้ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	77

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	78
ง.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	78
ง.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 10%.....	79
ง.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 30%.....	79
ง.15 ค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีกลีเซอรอล.....	80
ง.16 ค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีซูเรีย.....	80
ง.17 ค่าการรับแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีแอม โมเนียม คลอไรด์.....	80
จ.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้ง...81	81
จ.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%.....	81
จ.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%.....	82
จ.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรง โค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	82

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	83
จ.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 10%.....	83
จ.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 30%.....	84
จ.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแข็ง.....	84
จ.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอกอฮอล์ 10%.....	85
จ.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิไวนิล แอกอฮอล์ 30%.....	85
จ.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 10%.....	86
จ.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิแลคติก แอซิด 30%.....	86
จ.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 10%.....	87

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.14	ผลของเวลาในการเก็บค้ำค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็ง- พอลิคาโพรแลค โทน 30%.....87
จ.15	ค้ำค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็งที่มีกลีเซอรอล.....88
จ.16	ค้ำค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็งที่มียูเรีย.....88
จ.17	ค้ำค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแข็งที่มีแอม โมเนียม คลอไรด์.....88
ฉ.1	ค้ำค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟม.....89
ช.1	น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากเอน ไซม์ของคอมพอสิต โฟม.....89
ซ.1	ค้ำค่าความหนาแน่นของคอมพอสิต โฟม.....90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างของแป้ง.....3
1.2	โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติ.....3
2.1.	แผนภาพแสดงประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ.....6
4.1	ภาพตัดขวางของ โฟมจากแป้งมันสำปะหลังและคอมพอสิต โฟมจากกลีโองสแกนนิ่ง อิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคป
	(ก) โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง
	(ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%
	(ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลกติก แอซิด 30%
	(ด) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลค โทน 30%.....18
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 9 วันของ
	(ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์
	(ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลกติก แอซิด
	(ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลค โทน.....20

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับระยะเวลา	
ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ของ	
(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์	
(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด	
(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลค โทน.....22	
4.4	
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์	
สังเคราะห์ ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....23	
4.5	
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของ โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง	
ที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ในการทำให้	
สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....24	
4.6	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมกับความชื้นสัมพัทธ์	
ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วันของ	
(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์	
(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด	
(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลค โทน.....26	

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
<p>4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วันของ</p> <p>(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์</p> <p>(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด</p> <p>(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....</p>	27
<p>4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมกับระยะเวลาในการทำให้ สมดุลที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ของ</p> <p>(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์</p> <p>(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด</p> <p>(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....</p>	29
<p>4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมกับ ระยะเวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ของ</p> <p>(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์</p> <p>(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด</p> <p>(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....</p>	30
<p>4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณ พอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....</p>	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณ พอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....	32
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรในการทำให้ สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน.....	33
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรในการทำให้ สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน.....	34
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วันของ (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....	36
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับ ความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วันของ (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับเวลาในการทำให้	
สมดุลที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ของ	
(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์	
(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด	
(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....38	
4.17	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบิดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับ	
เวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ของ	
(ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์	
(ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด	
(ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน.....39	
4.18	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณ	
พอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....40	
4.19	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบิดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับ	
ปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน.....41	
4.20	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง	
ที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ในการทำให้	
สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน.....42	

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจาก แป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ใน การทำให้สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน.....	42
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์	43
4.23 การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ α -อะไมเลสของคอมพอสิต โฟม.....	44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 1

บทนำ

"โฟม (Foam)" เป็นคำที่รู้จักกันทั่วไปและถูกใช้ในความหมายที่กว้าง หากพิจารณาตามความหมายของคำแปลจะหมายถึง "ฟู" โฟมในที่นี้หมายถึงวัตถุที่มีน้ำหนักเบาภายในเนื้อวัตถุมีรูฟองอากาศจำนวนมาก ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายฟองน้ำธรรมชาติ พลาสติกที่ใช้ทำโฟมมีทั้งชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน ไวนิลอีพอกซี พอลิเอทิลีน ซิลิโคน เซลลูโลซิก เป็นต้น แต่ที่มีการใช้แพร่หลายคือ พอลิสไตรีนและพอลิยูรีเทน

ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์โฟมพลาสติกที่รู้จักกันทั่วไป เช่น ฟองน้ำ กล่องโฟมใส่อาหาร โฟมแผ่น โฟมฉนวนเพื่อใช้เป็นฉนวน เป็นต้น ข้อดีของโฟมพลาสติกที่ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับปริมาตร มีสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องรับแรง และสามารถผลิตได้ตามรูปทรงที่ต้องการ

แม้ว่าโฟมพลาสติกจะมีข้อดีหลายประการในการนำมาใช้ประโยชน์ แต่ข้อเสียที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้จากการนำโฟมพลาสติกมาใช้งานก็คือ โฟมพลาสติกต้องใช้ระยะเวลาในการสลายตัวค่อนข้างนาน โดยมากใช้เวลานานกว่า 10 ปี ทำให้โฟมพลาสติกภายหลังการใช้งานกลายเป็นขยะที่จำเป็นต้องกำจัด แนวทางหนึ่งสำหรับทางออกในการใช้บรรจุภัณฑ์ประเภทโฟมคือ การเลือกใช้โฟมที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biobased polymers) สำหรับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป โดยเฉพาะความแข็ง (Stiffness modulus) แม้ว่าคุณสมบัติยืดหยุ่น (Flexible) ค่อนข้างจะต่ำก็ตาม นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญต่อการนำไปใช้งานคือสามารถสลายตัวได้ในธรรมชาติ โดยการกำจัดพอลิเมอร์ชีวภาพมักใช้วิธีการเกี่ยวกับการกำจัดขยะอินทรีย์ ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพจะใช้เวลาน้อยกว่า 2 เดือนในการสลายตัว เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไปซึ่งใช้เวลานานกว่า 10 ปี ซึ่งถือได้ว่าเร็วอย่างมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงทำให้การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

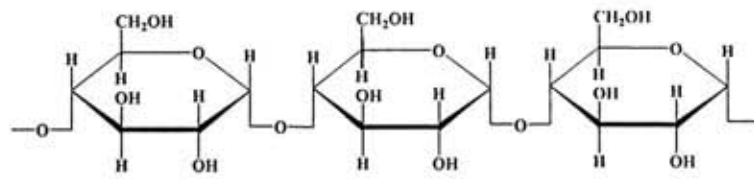
ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยพยายามผลิตโฟมที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก (Starch foam) ออกมาใช้ทดแทนโฟมพลาสติก เมื่อมีการให้ความร้อนและความชื้นแก่แป้งจะทำให้แป้งเปลี่ยนสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ทำให้สามารถใช้กระบวนการผลิตที่ใช้กันโดยทั่วไปได้เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นอกจากนี้แป้งมีราคาต่ำกว่าพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีน ซึ่งจะทำให้โฟมจากแป้งมีต้นทุนของวัตถุดิบที่ต่ำกว่าโฟมพลาสติกอีกด้วย โดยแป้งที่ศึกษาในงานวิจัยมีหลากหลาย เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งสาลีและแป้งมันสำปะหลัง แต่ถึงแม้ว่าโฟมที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักจะมีจุดเด่นที่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ แต่สมบัติของโฟมดังกล่าวยังไม่สามารถตอบสนองความ

ต้องการในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ทั้งหมด เนื่องจากสมบัติทางกลของโฟมจากแป้งยังค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้โฟมจากแป้งยังมีความไวต่อความชื้น สามารถละลายน้ำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำเอาโฟมจากแป้งนี้ไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารประเภทน้ำได้

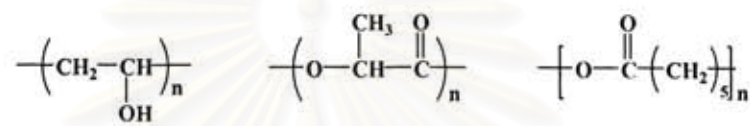
จากข้อด้อยดังกล่าวของโฟมจากแป้ง นักวิจัยจึงได้พยายามพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของโฟมจากแป้งให้มีสมบัติที่สามารถตอบสนองในการใช้งานได้อย่างครอบคลุมไม่ว่าจะใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือการเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่นลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟม โดยวัสดุที่ได้นี้จะเรียกว่า คอมพอสิต โฟม (Composite foam) ซึ่งสมบัติของคอมพอสิต โฟมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ที่เติมลงไป

วัสดุคอมพอสิต (Composite) คือ สารเนื้อผสม (Heterogeneous substance) ที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดหรือมากกว่าผสมกันโดยไม่ทำให้สมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดเสียไป แต่ทำให้เกิดสมบัติใหม่ตามที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบข้อดีระหว่างวัสดุคอมพอสิตกับพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือโคพอลิเมอร์ (Copolymer) แล้วจะพบว่า วัสดุคอมพอสิตมีความสามารถในการเสริมแรงที่ดีกว่า โดยจะทำให้สมบัติในการต้านแรงดึง (Tensile strength) ด้านแรงกด (Compression strength) ด้านแรงกระแทก (Impact strength) รวมทั้งความแข็ง (Rigidity) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมบัติด้านอื่น ๆ เช่น การต้านการติดไฟ (Fire retardancy) สมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical properties) ก็เพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นคอมพอสิตด้วย ดังนั้นวัสดุคอมพอสิตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้มีสมบัติเป็นตามที่ต้องการ

ประเทศไทยเป็นประเทศ агрกรรมที่มีพืชผลทางการเกษตรเป็นผลผลิตหลักของประเทศ มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นอาชีพหลักของเกษตรกรกว่า 3 ล้านคน แต่มักจะประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด ราคาตกต่ำและไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากหัวมันสำปะหลังส่วนใหญ่นำไปแปรรูปเป็นอาหารสัตว์และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีมูลค่าต่ำและขาดเทคโนโลยีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่สูงกว่า งานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาแป้งมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอมพอสิต โฟม โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมจากแป้ง สำหรับพอลิเมอร์ที่เลือกใช้นี้เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติ เช่น พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid) และพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) ซึ่งพอลิเมอร์ดังกล่าวนี้มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะทำให้คอมพอสิต โฟมจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น งานวิจัยนี้ได้เสนออีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเพิ่มศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากการแปรรูปแป้งมันสำปะหลังให้มีมูลค่าสูงขึ้น และเพื่อส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการทดแทนโฟมพลาสติกที่ย่อยสลายยาก โดยการผลิตโฟมซึ่งหลังจากใช้งานแล้วสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดวัสดุหลังการใช้งานแล้ว



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของแป้ง



พอลิไวนิล แอลกอฮอล์

พอลิแลคติก แอซิด

พอลิคาโพรแลกโตน

รูปที่ 1.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ที่มาของปัญหาและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

"โฟม (Foam)" เป็นคำที่รู้จักกันทั่วไปและถูกใช้ในความหมายที่กว้าง หากพิจารณาตามคำแปลจะหมายถึง "ฟู" โฟมในที่นี้หมายถึงวัตถุที่มีน้ำหนักเบาภายในเนื้อวัตถุมีรูฟองอากาศจำนวนมาก ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายฟองน้ำธรรมชาติ พลาสติกที่ใช้ทำโฟมมีทั้งชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน ไวนิลอีพอกซี พอลิเอทิลีน ซิลิโคน เซลลูโลซิก เป็นต้น แต่ที่มีการใช้แพร่หลายคือ พอลิสไตรีนและพอลิยูรีเทน

การผลิตโฟมทำได้ 2 วิธีคือ การผลิตโฟมโดยกระบวนการทางกายภาพและการผลิตโดยกระบวนการทางเคมี วิธีการผลิตโฟมผ่านกระบวนการทางกายภาพทำโดยใช้แก๊สอัดหรือผสมสารเคมีที่ทำให้เกิดแก๊ส (Blowing agent) เข้าไปในเนื้อวัตถุดิบพลาสติกขณะที่ทำการผลิต เมื่อนำวัตถุดิบนี้ไปผ่านกรรมวิธีการผลิตโฟมโดยใช้ความร้อน แก๊สซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพลาสติกฟูขึ้นเป็นโฟม เช่น พอลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene) ซึ่งนิยมใช้แก๊สเพนเทน (Pentane) เป็นสารทำให้เกิดการขยายตัว ส่วนการผลิตที่ผ่านกระบวนการทางเคมีจะใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีสองชนิดในการทำให้เกิดโฟม วัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยของเหลวสองชนิดหรือมากกว่า โดยชนิดหนึ่งเป็นพลาสติกเหลว (Resin) อีกชนิดหนึ่งเป็นของผสมของวัสดุคกผลึกหรือทำให้แข็งตัว และสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกเหลวแล้วทำให้เกิดแก๊สขึ้น (Foaming agent หรือ Blowing agent) เมื่อของเหลวทั้งสองชนิดแยกกันอยู่จะยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ เช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของไอโซไซยานาต (Isocyanate) กับน้ำ

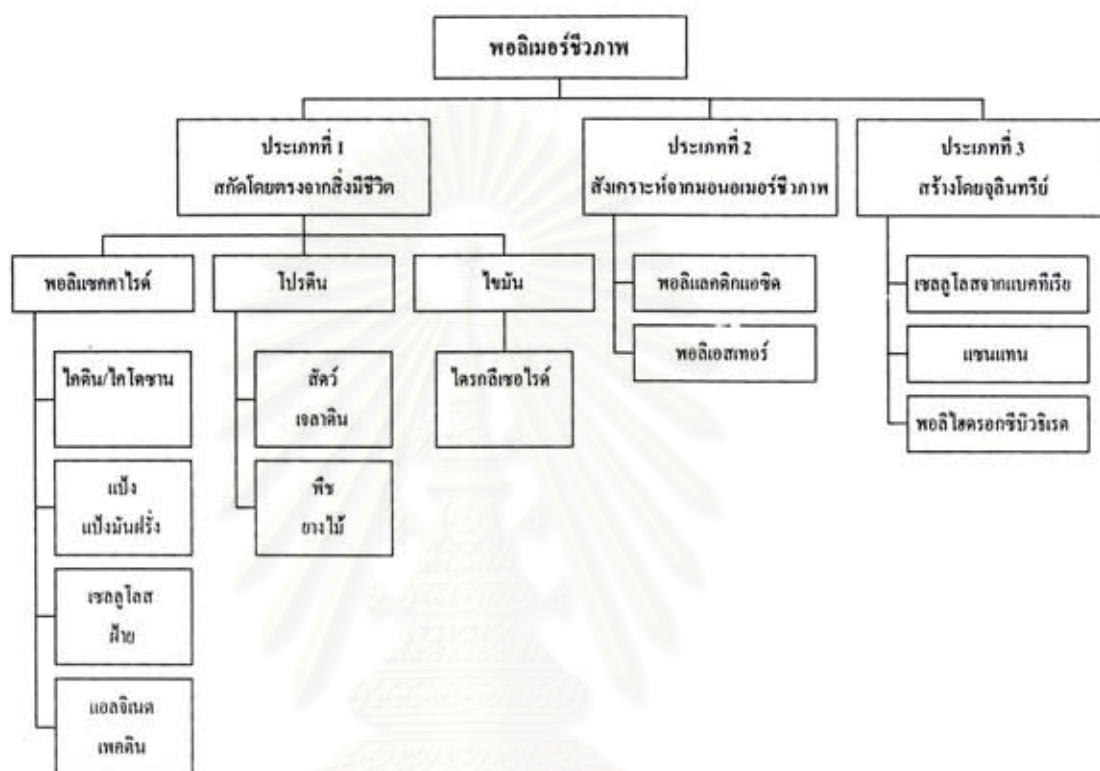
ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์โฟมพลาสติกที่รู้จักกันทั่วไป เช่น ฟองน้ำ กล่องโฟมใส่อาหาร โฟมแผ่น โฟมฉนวนเพื่อเป็นฉนวน เป็นต้น ซึ่งโฟมพลาสติกเหล่านี้จะผลิตจากพลาสติกแตกต่างประเภทกันออกไป โดยโฟมพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย คือ พอลิสไตรีน ซึ่งใช้ทำโฟมสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ใส่อาหาร และพอลิเอทิลีนซึ่งใช้ทำทั้งบรรจุภัณฑ์ วัสดุกันกระแทกและฉนวนกันความร้อน ข้อดีของโฟมพลาสติกที่ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับปริมาตร มีสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องรับแรง และสามารถผลิตได้ตามรูปทรงที่ต้องการ

แม้ว่าโฟมพลาสติกจะมีข้อดีหลายประการในการนำมาใช้ประโยชน์ แต่ข้อเสียที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้จากการนำโฟมพลาสติกมาใช้งานก็คือ โฟมพลาสติกต้องใช้ระยะเวลาในการสลายตัวค่อนข้างนาน โดยมากใช้เวลานานกว่า 10 ปี ทำให้โฟมพลาสติกภายหลังการใช้งานกลายเป็นขยะที่จำเป็นต้องกำจัด ปริมาณการใช้โฟมในประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 30,000 ตันต่อปี โดยมีการผลิตภายในประเทศประมาณ 25,000 ตันต่อปี ที่เหลือนำเข้าจากต่างประเทศประมาณ 5,000 ตันต่อปี ซึ่ง

หลังจากใช้งานแล้ว โฟมเหล่านี้จะกลายเป็นขยะที่ต้องกำจัดทิ้ง โดยเฉพาะในกรุงเทพฯ ซึ่งมีปริมาณการใช้โฟมสูงถึง 15,000 ตันต่อปี ขยะ โฟมเหล่านี้ยากต่อการทำลายทิ้ง แม้จะมีความพยายามรณรงค์ให้มีระบบการคัดแยกขยะเกิดขึ้นเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ แต่ก็ยังไม่ได้รับการตอบสนองเท่าที่ควร นอกจากนี้ขยะ โฟมยังเสียดำเนินการกำจัดสูงกว่าขยะมูลฝอยทั่วไป แนวทางหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดขยะ โฟมคือการฝังกลบซึ่งต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก แต่โฟมมีอายุการสลายตัวนาน ดังนั้นการกำจัดขยะ โฟมโดยการฝังกลบทำให้ต้องขยายพื้นที่ในการฝังกลบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อีกแนวทางหนึ่งของการกำจัดขยะ โฟมคือการเผา ซึ่งต้องใช้เตาพิเศษจึงจะสามารถกำจัดได้หมด นอกจากนี้เวลาเผาทำลาย โฟมบางชนิดยังปล่อยแก๊สซีเอฟซี (CFC, Chloro fluoro carbon) ซึ่งเป็นสารที่เติมลงไปในการบวนการผลิตเพื่อทำให้เกิดการพองตัว แก๊สชนิดนี้เมื่อถูกปล่อยออกมาจะไปทำลายชั้น โอโซนของบรรยากาศและเป็นสาเหตุหนึ่งของปรากฏการณ์โลกร้อนอันเนื่องมาจากภาวะเรือนกระจก ถึงแม้ว่าปัจจุบัน โฟมประเภทดังกล่าวจะมีปริมาณการผลิตน้อยลง เนื่องจากได้ปรับเปลี่ยนจากการใช้สารซีเอฟซีมาเป็นแก๊สบิวเทน (Butane) หรือ เพนเทน (Pentane) แทนเพื่อมิให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในกระบวนการกำจัดด้วยการเผาก็ยังมีต้นทุนที่สูงและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ในกระบวนการทางวิทยาศาสตร์อีกวิธีหนึ่งที่สามารถกำจัดขยะประเภท โฟมพอลิสไตรีนคือการละลายโฟมด้วยตัวทำละลาย เช่น ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) แต่วิธีการดังกล่าวต้องมีกระบวนการกำจัดสารละลายภายหลังจากการละลายโฟมอีกด้วย ซึ่งสารละลายดังกล่าวนี้ค่อนข้างเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกวิธีกำจัดที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่าวิธีการใช้ตัวทำละลายเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่สำหรับประเทศไทยมีการลดปริมาณขยะ โฟมพลาสติกโดยกระบวนการรีไซเคิล โดยจะนำเอาของเสียที่ได้จากการผลิต โฟมกลับมาใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีการนำเอาขยะ โฟมไปรีไซเคิลเป็นพลาสติกพอลิสไตรีนเกรดต่ำอีกด้วย อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการลดปริมาณขยะ โดยการนำกลับไปใช้ใหม่ แต่ก็ยังเป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้น

แนวทางหนึ่งสำหรับทางออกในการใช้บรรจุภัณฑ์จาก โฟมคือ การเลือกใช้โฟมที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biobased polymers) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบที่ได้จากสิ่งมีชีวิตซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติทางชีวภาพที่ไม่สูญสิ้น (Renewable resource) พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ (1) พอลิเมอร์ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิต เช่น แป้ง เซลลูโลส ไคตินและไคโตซาน โดยมากจะอยู่ในจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์และ โปรตีน ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทนี้มักชอบน้ำ (2) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ชีวภาพ เช่น การผลิตพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)) จากกรดแลคติกที่ได้จากการหมักแป้ง และ (3) พอลิเมอร์ที่สร้างโดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ผ่านการตัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น เซลลูโลสจากแบคทีเรีย สำหรับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป โดยเฉพาะความแข็ง (Stiffness modulus ประมาณ 2,500 - 30,000 MPa) แม้ว่าความยืดหยุ่น (Flexible) ค่อนข้างจะต่ำก็ตาม นอกจากนี้แล้ว ปัจจัยสำคัญต่อการนำไปใช้งานคือสามารถสลายตัวได้โดยธรรมชาติ โดยการกำจัดพอลิเมอร์

ชีวภาพมักใช้วิธีการเดียวกับการกำจัดขยะอินทรีย์ ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพจะใช้เวลาน้อยกว่า 2 เดือนในการสลายตัว เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไปซึ่งใช้เวลามากกว่า 10 ปี จะถือได้ว่าเร็วกว่ามาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงทำให้การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม



รูป 2.1. แผนภาพแสดงประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ¹

ในปัจจุบัน ได้มีนักวิจัยพยายามผลิต โฟมที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก (Starch foam) ออกมาใช้ทดแทน โฟมพลาสติก เมื่อมีการให้ความร้อนและความชื้นแก่แป้งจะทำให้แป้งเปลี่ยนสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ทำให้สามารถใช้กระบวนการผลิตที่ใช้กันโดยทั่วไปได้เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)⁴ นอกจากนี้แป้งมีราคาค่าต่ำกว่าพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีน ซึ่งจะทำให้โฟมจากแป้งมีต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำกว่าโฟมพลาสติกอีกด้วย โดยแป้งที่ศึกษาในงานวิจัยมีหลากหลาย เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งสาลีและแป้งมันสำปะหลัง^{5,6} ดังเช่นที่สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปมันสำปะหลังเป็นวัสดุและภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับบรรจุอาหารพร้อมบริโภคเพื่อใช้ทดแทนภาชนะพลาสติกและโฟม^{7,8} โดยการเติมส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น พลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcing filler) และสารเชื่อม (Binder) ซึ่งสารดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง และการคงรูปที่ดีของภาชนะจากแป้งมัน

สำคัญ แต่ถึงแม้ว่าโฟมที่มีแข็งเป็นส่วนประกอบหลักจะมีจุดเด่นที่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ แต่สมบัติของโฟมดังกล่าวยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ทั้งหมด เนื่องจากสมบัติทางกลของโฟมจากแข็งยังค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้โฟมจากแข็งมีความไวต่อความชื้น สามารถละลายน้ำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำเอาโฟมจากแข็งนี้ไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารประเภทน้ำได้

จากข้อด้อยดังกล่าวของโฟมจากแข็ง นักวิจัยจึงได้พยายามพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของโฟมจากแข็งให้มีสมบัติที่สามารถตอบสนองได้อย่างครอบคลุมในการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือการเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่นลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟม โดยวัสดุที่ได้นี้จะเรียกว่า คอมพอสิตโฟม (Composite foam) ซึ่งสมบัติของคอมพอสิตโฟมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ที่เติมลงไป

วัสดุคอมพอสิต (Composite) คือ สารเนื้อผสม (Heterogeneous substance) ที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดหรือมากกว่าผสมกัน โดยไม่ทำให้สมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดเสียไป แต่ทำให้เกิดสมบัติใหม่ตามที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบข้อดีระหว่างวัสดุคอมพอสิตกับพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือโคพอลิเมอร์ (Copolymer) แล้วจะพบว่า วัสดุคอมพอสิตมีความสามารถในการเสริมแรงที่ดีกว่า โดยจะทำให้สมบัติในการต้านแรงดึง (Tensile strength) ด้านแรงกด (Compression strength) ด้านแรงกระแทก (Impact strength) รวมทั้งความแข็ง (Rigidity) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมบัติด้านอื่น ๆ เช่น การต้านการติดไฟ (Fire retardancy) สมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical properties) ก็เพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นคอมพอสิตด้วย ดังนั้นวัสดุคอมพอสิตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้มีสมบัติเป็นตามที่ต้องการ

ประเทศไทยเป็นประเทศ агрกรรมที่มีพืชผลทางการเกษตรเป็นผลผลิตหลักของประเทศ มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นอาชีพหลักของเกษตรกรกว่า 3 ล้านคน แต่มักจะประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด ราคาตกต่ำและไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากหัวมันสำปะหลังส่วนใหญ่นำไปแปรรูปเป็นอาหารสัตว์และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีมูลค่าต่ำและขาดเทคโนโลยีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่สูงกว่า ทำให้มันสำปะหลังกลายเป็นปัญหาสำคัญของชาติ ที่ทุกรัฐบาลต้องทุ่มงบประมาณเพื่อแก้ปัญหา นอกจากนี้สหภาพยุโรปผู้นำเข้ารายใหญ่มันเส้นและมันอัดเม็ดของไทย ได้มีการกีดกันทางการค้าทำให้ปริมาณการส่งออกและราคามันสำปะหลังแปรรูปลดลงและในอนาคตปัญหานี้อาจจะรุนแรงยิ่งขึ้น ดังเห็นได้จากรายงานปริมาณและมูลค่าการส่งออกของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังซึ่งแสดงในตารางที่ 1. งานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาแข็งมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัสดุคิบในการผลิตคอมพอสิตโฟม โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมจากแข็ง สำหรับพอลิเมอร์ที่เลือกใช้นี้เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติ เช่น พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid) และพอลิคาโปรแลคโตน (Polycaprolactone) ซึ่ง

พอลิเมอร์ดังกล่าวนี้มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะทำให้คอมพอสิตโฟมจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จะเสนออีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเพิ่มศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากการแปรรูปแป้งมันสำปะหลังให้มีมูลค่าสูงขึ้น และเพื่อส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการทดแทนโฟมพลาสติกที่ย่อยสลายยาก โดยการผลิตโฟมซึ่งหลังจากใช้งานแล้วสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดวัสดุหลังการใช้งานแล้ว

ตาราง 2.1. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2545¹⁰

ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่ารวม (บาท)	มูลค่า (บาทต่อหนึ่งกิโลกรัม)
มันสำปะหลังอัดเม็ดแข็ง	536,559,000	1,389,560,336	2.58
มันสำปะหลังเป็นชิ้น	897,488,580	2,476,565,298	2.76

ที่มา: กองตรวจสอบและมาตรฐานสินค้า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โฟมพองตัวจากแป้ง (Expanded Starch-Based Foam) ได้เริ่มมีการผลิตตั้งแต่ปีพ.ศ. 2513 เป็นต้นมา โดยเริ่มแรกใช้น้ำเป็นสารทำให้ฟูโดยการผ่านขบวนการอัดรีด (Extrusion) แต่โฟมที่ผลิตได้ในช่วงนี้ยังไม่สามารถทำให้มีรูพรongที่ต้องการได้ เนื่องจากในขบวนการให้ความร้อนแก่แป้ง ความร้อนจะทำให้แป้งสูญเสียความชื้นและทำให้แป้งเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน²

ในปี พ.ศ. 2536 Tiefenbacher สามารถเตรียม โฟมจากแป้งด้วยกระบวนการอบ (Baking process) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการอบก้อนแป้งที่เติมน้ำและนวดจนเข้ากันแล้วใส่ลงในแม่แบบที่ร้อน หลังจากนั้นก้อนแป้งจะเริ่มเกิดเป็นเจล (Gelatinization) พองตัวและแห้งจนได้โฟมในที่สุด³

ในปี พ.ศ. 2541 Shogren และคณะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีผนังบางๆด้วย โฟมจากแป้ง (Starch foam) โดยวิธีการอบในแม่แบบปิด (Closed mold) ในขั้นแรกก้อนแป้งที่ผ่านการเติมน้ำแล้วจะถูกนวดจนมีความยืดหยุ่นพอเหมาะ เมื่อก้อนแป้งได้รับความร้อนน้ำที่อยู่ภายในเนื้อแป้งจะเกิดการระเหยและเกิดเป็นฟองอากาศขึ้นภายในเนื้อแป้ง ต่อจากนั้นความหนืดของเนื้อแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายหลังจากการขยายตัวของเนื้อแป้ง จนในที่สุดแป้งจะเกิดการแข็งตัวซึ่งทำให้โฟมมีรูพรongที่คงตัวรวมทั้งป้องกันการยุบตัวเนื่องจากการระเหยของน้ำ โฟมดังกล่าวจะมีความหนาแน่นสูงบริเวณผนังภายนอก ส่วนภายในเนื้อโฟมจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือมีลักษณะเป็นเซลล์แบบเปิด (Open cell)⁴ ความหนาแน่นและสมบัติทางกลของโฟมจากแป้งสามารถควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนสูตรของแป้งผสม แป้งผสมที่สามารถแข็งตัวได้เร็ว (แข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ)

เช่น แป้งที่มีปริมาณของอะไมโลสต่ำ แป้งที่มีปริมาณของแป้งหรือมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะทำให้ โฟมที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ ความต้านทานต่อแรงกดต่ำแต่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ โฟมสไตรีนจะพบว่า โฟมจากแป้งมีความหนาแน่นสูงกว่าแต่มีความแข็งแรงต่ำกว่า โดยเฉพาะทั้ง ในสถานะที่มีความชื้นสูงและต่ำ บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากโฟมจากแป้งจะมีความไวค่อน้ำค่อนข้างมาก เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer)

ในปีพ.ศ. 2541 สายสนม ประดิษฐ์กวงและงามทิพย์ ภู่วโรดม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปแป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุและภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีชื่อเรียกว่า KU-GREEN ซึ่งมีลักษณะเป็นภาชนะบรรจุทรงรูป มีฟองอากาศกระจายภายในเนื้อวัสดุ ลักษณะคล้ายโฟมพลาสติก ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารพร้อมบริโภคแบบใช้ครั้งเดียว (Disposable package) โดยวัสดุหลักคือแป้งมันสำปะหลังที่มีการผสมพลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcing filler) โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานนี้ประกอบไปด้วย พอลิแอลกอฮอล์ โมโน-ได- และโอลิโกแซคคาไรด์รวมทั้งลิกนินและอนุพันธ์ โดยที่พลาสติกไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ความยืดตัว ความสะดวกในการขึ้นรูปและปรับความหนืดของส่วนผสมได้ ส่วนสารเพิ่มความแข็งแรงเช่น ผงหินปูนและเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและช่วยลดการดูดซับน้ำและไขมัน นอกจากนี้ยังเติมสารเชื่อม (Binder) เช่น ไฮโดรคอลลอยด์ต่าง ๆ เช่น แอลจินัต คาร์ราจีแนน วุ้น และพวกโปรตีนในกรณีที่ต้องการให้มีความเหนียวและผิวเรียบมากขึ้น การขึ้นรูปทำได้โดยการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding) หรือการอบขึ้นรูป (Compression Molding) ที่ช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส หรือโดยวิธีหล่อ (Casting) แล้วนำไปอบแห้งที่ช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 100 องศาเซลเซียสขึ้นกับรูปทรงของภาชนะที่ต้องการ

ในปีพ.ศ. 2544 งามทิพย์ ภู่วโรดมและสายสนม ประดิษฐ์กวง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปมันสำปะหลังเป็นวัสดุและภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcing filler) เช่นผงหินปูนหรือกากมันสำปะหลัง จาก 0-2% เป็น 0-30% ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเติมด่างหรือเกลือเช่น โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (K_2CO_3) โซเดียม คาร์บอเนต (Na_2CO_3) เพื่อช่วยให้ส่วนผสมต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดอุณหภูมิและหรือเวลาในการขึ้นรูปอีกด้วย

อย่างไรก็ตามเนื่องจากโฟมจากแป้งเพียงอย่างเดียวมักประสบปัญหาที่ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปมีความเสถียรต่ำและยังมีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโฟมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่นพอลิสไตรีนหรือ พอลิยูรีเทน จึงได้มีการพยายามเติมพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ลงไปในแป้งเพื่อผลิตเป็นคอมพอสิต โฟมเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟมจากแป้งให้ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

ในปี พ.ศ. 2538 Bhatnagar และ Hanna เตรียมคอมพอสิต โฟมจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลส 25% กับพอลิสไตรีน และพอลิเมธิลเมตาไครเลตในสัดส่วน 70:30 โดยใช้กระบวนการอัดรีด คอมพอสิต โฟมที่ผลิตได้จะมีค่าการละลายในน้ำ (Water solubility indices, WSI) ลดลงประมาณ 4-13% เมื่อเปรียบเทียบกับ โฟมจากแป้งเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการที่คอมพอสิต โฟมจากแป้งมีส่วนประกอบของพอลิสไตรีนอยู่ด้วยจะทำให้การสลายตัวตามธรรมชาติของ โฟม เกิดได้ยากขึ้น¹¹

แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิต โฟมจากแป้งให้มีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีขึ้น โดยที่ไม่ทำให้สมบัติการสลายตัวตามธรรมชาติลดลง ไปด้วยคือการเลือกใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติเป็นส่วนผสมในการผลิตคอมพอสิต โฟม ตัวอย่างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ เช่น พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิด และพอลิคาโพรแลค โทน

พอลิไวนิล แอลกอฮอล์เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติและมีสมบัติโดดเด่นในด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ดังนั้นนักวิจัยจึงให้ความสนใจที่จะนำเอาพอลิไวนิล แอลกอฮอล์มาเป็นส่วนประกอบในคอมพอสิต โฟมจากแป้งเพื่อทำให้คอมพอสิต โฟมมีสมบัติที่ดีขึ้น Bastioli และคณะศึกษากระบวนการอัดรีดเข้าแม่แบบของคอมพอสิต โฟมของแป้งและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ ในระบบหลอมเหลวแบบเนื้อเดียว จากการทดลองพบว่าคอมพอสิต โฟมนี้มีสมบัติการอยู่ตัวของรูปทรง (Dimension stability) ที่ดีขึ้นในสภาวะที่มีความชื้นสูง¹²

ในปีพ.ศ. 2541 Shogren และคณะเตรียมคอมพอสิต โฟมจากแป้งมันฝรั่งและแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ด้วยวิธีการอบ คอมพอสิต โฟมที่ได้จะมีความแข็งแรง ความยืดหยุ่นและการทนต่อน้ำได้มากขึ้นถ้าหากว่าคอมพอสิต โฟมมีส่วนผสมของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์อยู่ประมาณ 10-30% ด้วยสมบัติที่ดีขึ้นนี้เองทำให้คอมพอสิต โฟมจากแป้งมันฝรั่งและแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิล แอลกอฮอล์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับหีบห่อ¹³

ในปีพ.ศ. 2542 Liu และคณะศึกษาการเตรียม การผลิตและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกของแป้งสาลีและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ โดยมีรายงานว่าถ้ามีการผสมของกรีเซอร์ลิน และน้ำในสัดส่วน 50/50 โดยน้ำหนักจะทำให้ส่วนผสมมีพฤติกรรมการไหล สมบัติทางกลและความทนต่อสภาวะแวดล้อมที่ดีที่สุด การที่พอลิไวนิล แอลกอฮอล์แทรกเข้าไปในเนื้อของแป้งมีผลทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีผลทำให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นด้วย

พอลิแลคติก แอซิดเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ในธรรมชาติ เนื่องจากพอลิแลคติก แอซิดสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติ นั่นคือกรดแลคติก แต่ว่ามีอัตราการสลายตัวที่ค่อนข้างช้าเนื่องจากมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง พอลิแลคติก แอซิดมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งแรงและ โมดูลัสสูง ปัจจุบันนิยมนำเอาพอลิแลคติก แอซิด ไปใช้ในวงการแพทย์และบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม

ในปี พ.ศ. 2540 Wang และ Shogren ผลิต โฟมจากแป้งข้าวโพดผสมกับพอลิแลคติก แอซิด ด้วยวิธีการอัดรีด จากรายงานพบว่า โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิแลคติก แอซิดในสัดส่วน 10-15% จะมีความหนาแน่นต่ำที่สุดและมีค่าความยืดหยุ่น (Resilience) สูงที่สุด¹⁴

ในปี พ.ศ. 2543 Fang และ Hanna ศึกษาสมบัติของคอมพอสิต โฟมที่เตรียมจากแป้งและพอลิแลคติก แอซิด จากการวิจัยพบว่า การเติมพอลิแลคติก แอซิดลงไปผสมกับแป้งข้าวโพดธรรมดา (Regular corn starch) ซึ่งมีปริมาณของอะไมโลสอยู่ประมาณ 25% และแป้งข้าวโพดเหนียว (Waxy corn starch) พบว่าทำให้คอมพอสิต โฟมมีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งทางด้านกายภาพและทางกล และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างคอมพอสิต โฟมจากแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวโพดเหนียวพบว่าแป้งข้าวโพดเหนียวจะให้คอมพอสิต โฟมที่มีการขยายตัวที่ดีกว่า และมีค่าการละลายน้ำและความสามารถในการรับแรงกดที่สูงกว่า ในขณะที่มีค่าสปริงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต โฟมจากแป้งข้าวโพดธรรมดา โดยที่คอมพอสิต โฟมที่ผลิตจากแป้งข้าวโพดเหนียวผสมกับพอลิแลคติก แอซิด ในปริมาณ 40% และมีความชื้นอยู่ประมาณ 19% จะมีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีที่สุด¹⁵

นอกจากนี้พอลิเอสเทอร์ก็เป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งสามารถละลายตัวได้ตามธรรมชาติ และสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อผลิตเป็นคอมพอสิต โฟม โดยเฉพาะพอลิคาโพรแลค โทนเนื่องจากมีสมบัติโดดเด่นในด้านความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆเนื่องจากมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ค่อนข้างสูง ในขณะที่เดียวกันยังมีสมบัติทางกลที่ดีอีกด้วย

ปี พ.ศ. 2538 Koenig และ Huang ผสมพอลิคาโพรแลค โทนกับอนุพันธ์ของแป้ง จากการทดลองพบว่าเมื่อผสมแป้งกลานูล่า (Granular starch) หรือแป้งอะซิเตต (Starch acetate) กับพอลิคาโพรแลค โทน จะทำให้โมดูลัสเพิ่มขึ้นแต่จะลดความแข็งแรงโดยรวมลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ก่อนการผสม¹⁶

ปี พ.ศ. 2543 Averous และคณะศึกษาสมบัติของแผ่นเทอร์โมพลาสติกผสมจากแป้งและพอลิคาโพรแลค โทน จากลักษณะทางความร้อน ทางกลความร้อน (Thermo-mechanical characteristic) และทางกลของพอลิเมอร์ผสมแสดงให้เห็นว่าเกิดการแยกเฟสขึ้นในพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติของส่วนผสมที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีพอลิคาโพรแลค โทนผสมอยู่ด้วย เมื่อเนื้อแป้ง (Starch matrix) อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) การผสมพอลิคาโพรแลค โทนลงไปจะทำให้โมดูลัสมีค่าลดลงแต่ความต้านทานต่อแรงกระทำจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าหากเนื้อแป้งอยู่ในสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) โมดูลัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมพอลิคาโพรแลค โทน¹⁷

นอกจากนี้ในต่างประเทศยังได้มีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับคอมพอสิต โฟมจากแป้งดังแสดงในภาคผนวก ฉ. อีกด้วย

ถึงแม้ว่าในประเทศไทยจะมีการคิดค้นผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากมันสำปะหลังแล้ว เช่นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แต่เนื่องจากส่วนผสมดังกล่าวประกอบไปด้วยวัสดุธรรมชาติทั้งหมด เช่นแป้งมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลังซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งแม้ว่าจะมีข้อดีในแง่การสลายตัวตามธรรมชาติ แต่เมื่อพิจารณาในแง่ความแข็งแรงแล้วพบว่า ยังต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไป ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะวิจัยคอมพอสิตโฟมจากแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ โดยเฉพาะ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดี มีแนวโน้มที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมพอสิตโฟมจากแป้งมันสำปะหลังให้ดีขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติ เป็นไปได้ว่าคอมพอสิตโฟมดังกล่าวนี้จะสามารถสลายตัวตามธรรมชาติได้ไม่แตกต่างจากโฟมจากแป้งเพียงอย่างเดียว แม้ว่าจะมีรายงานการศึกษาวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับคอมพอสิตโฟมจากแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติแล้ว แต่ในรายงานการวิจัยส่วนใหญ่จะใช้แป้งข้าวโพดหรือแป้งมันฝรั่งเป็นวัตถุดิบ ซึ่งในประเทศไทยแป้งดังกล่าวมีปริมาณน้อยกว่าและมีราคาแพงกว่าแป้งมันสำปะหลัง และเนื่องจากแป้งแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้แป้งแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการที่จะเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังในงานวิจัยนี้

งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยการเตรียมเป็นคอมพอสิตโฟมของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทน โดยจะศึกษาและเปรียบเทียบผลของสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังและพอลิเมอร์ที่เดิมที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและการเพิ่มความสามารในการต้านทานความชื้นของคอมพอสิตโฟมที่เตรียมได้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการสลายตัวของคอมพอสิตโฟมที่เตรียมได้โดยการย่อยสลายคอมพอสิตโฟมจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์อะไมเลส

ศูนย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง จากบริษัท Siam Modified Starch ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิคาโพรแลคโตนและพอลิแลคติก แอซิด โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สั่งซื้อจากบริษัทฟลูคา (Fluka) ส่วนพอลิคาโพรแลคโตนและพอลิแลคติก แอซิดสั่งซื้อจากบริษัทไดเซรุ เคมีคัล จำกัด (Daiseru Chemical Co., Ltd.) ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2 พลาสติกไซเซอร

พลาสติกไซเซอรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ แอมโมเนียม คลอไรด์ (Ammonium chloride) กลีเซอรอล (Glycerol) และยูเรีย (Urea) โดยสั่งซื้อจากบริษัท Carlo Erba

3.1.3 สารเติมแต่ง

กัวกัม (Guar gum) สั่งซื้อจากบริษัทซิกมา (Sigma Chemical) ส่วนแมกนีเซียมสเตริยเรต (Magnesium stearate) สั่งซื้อจากบริษัทคอน เคมีคัล ประเทศไทย จำกัด (Coin Chemical (Thailand) Co., Ltd.)

3.1.4 เกลีสําหรับควบคุมความชื้น

เกลีสําหรับควบคุมความชื้นในงานวิจัยนี้แสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออัมตัวชนิดต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส

สารละลายเกลือ	แหล่งผลิต	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
ลิเทียม คลอไรด์	UNILAB	11
แมกนีเซียม คลอไรด์	UNILAB	32
โพแทสเซียม คาร์บอเนต	UNILAB	42
แมกนีเซียม ไนเตรต	UNILAB	52
คอปเปอร์ (II) คลอไรด์	AnalaR	67
โซเดียม คลอไรด์	Carlo Erba	75

3.1.5 สารเคมี

ไดเอทิล อีเทอร์ (Diethyl ether) ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับวัดความถ่วงจำเพาะของคอมพอสิต โฟม สั่งซื้อจากบริษัท เจ ที เบเกอร์ (J. T. Beaker)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง Compression Molding

เครื่อง Compression molding ยี่ห้อ Lab Tech รุ่น LP20 สำหรับขึ้นรูปคอมพอสิต โฟม

3.2.2 กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคป

กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5200 ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของคอมพอสิต โฟม

3.2.3 เครื่อง Lloyd Tensile Tester

เครื่อง Lloyd Tensile Tester รุ่น LRX สำหรับวัดสมบัติทางกลของคอมพอสิต โฟม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมคอมพอสิต โฟมที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก

อบแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นผสมแป้งมันสำปะหลัง กวักัม (1% โดยน้ำหนักของแป้ง) และแมกนีเซียมอะซิเตต (2% โดยน้ำหนักของแป้ง) ด้วยเครื่องผสม เติมน้ำกลั่น แล้วผสมต่อไปอีก 20 นาที เติมหอติเมอร์สังเคราะห์ที่ขยอชละลายได้และพลาสติกไซเซอร์

นำส่วนผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที แล้วปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้แผ่นคอมพอสิต โฟมของแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ขยอชละลายได้ นำแผ่น โฟมที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของคอมพอสิต โฟม

3.3.2.1. โครงสร้างระดับจุลภาคของคอมพอสิต โฟม

วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของคอมพอสิต โฟม โดยใช้กล้องสแกนนิ่ง อิเล็กตรอน ไมโครสโคป (SEM)

3.3.2.2 การควบคุมปริมาณความชื้นในชิ้นงาน (Humidity Control)

ใส่แผ่นคอมพอสิต โฟมลงในภาชนะปิดที่ควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ ตามชนิดของสารละลายเกลือ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาที่กำหนด

3.3.2.3. การวัดปริมาณความชื้น

นำคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่ 50 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อคำนวณปริมาณความชื้นในคอมพอสิต โฟม

3.3.2.4 การวัดปริมาณการดูดซับน้ำ

วัดน้ำหนักของคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการทำให้สมดุลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50% แล้วจุ่มขึ้นตัวอย่างลงในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสนาน 10 นาที เพื่อชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น แล้วคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟม

3.3.2.5 สมบัติเชิงกล

3.3.2.5.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

นำคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการทำให้สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ มาวัดการทนต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดโดยใช้เครื่อง Lloyd Tensile Tester โดยมีระยะดึง (gauge length) เป็น 188 มิลลิเมตรและความเร็วในการดึง (crosshead speed) เป็น 5.2 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3.2.5.2 ความต้านทานต่อแรงโค้งงอ (Flexural Strength)

นำคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการทำให้สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ วัดความต้านทานต่อแรงโค้งงอและค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอโดยใช้เครื่อง Lloyd Tensile Tester โดยวิธี three point bending method และความเร็วในการวัด (crosshead speed) เป็น 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3.2.6. การศึกษาการย่อยสลายด้วยเอนไซม์

ตัดชิ้นงานคอมพอสิต โฟมขนาด 15.0×50.7 ตารางมิลลิเมตร และชั่งน้ำหนัก (0.1-0.2 กรัม) จากนั้นจุ่มชิ้นงานคอมพอสิต โฟมลงในขวดทดลองที่ผสม 0.05 M อะซิเตด บัฟเฟอร์ (Acetate buffer) ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 6.0 จำนวน 25 มิลลิลิตร กับเอนไซม์อะไมเลส (Termamyl 120 α -amylase) จำนวน 1 มิลลิลิตร และ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 54 มิลลิโมล หลังจากนั้นนำชิ้นงาน

คอมพอสิตขึ้นจากสารละลายเอนไซม์ที่เวลา 5 10 15 20 30 40 50 60 120 และ 180 นาที ล้างชิ้นงาน
คอมพอสิตโฟมด้วยน้ำกลั่น และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง แล้ววัดน้ำ
หนักที่หายไป เพื่อกำหนดหาปริมาณ โฟมที่ย่อยสลายไปด้วยเอนไซม์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอมพอสิตโฟม

คอมพอสิต โฟมที่มีแข็งเป็นส่วนประกอบหลักสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้โดยกรรมวิธีการอบ จากการศึกษาของ Shogren และคณะ พบว่าในการอบแข็งให้กลายเป็นโฟมนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับ โมเลกุลของแข็งดั้งเดิม เริ่มแรกเมื่ออุณหภูมิในแม่แบบสูงขึ้น น้ำที่ผสมอยู่กับแข็งเริ่มระเหยกลายเป็นไอ แข็งก็จะเริ่มกลายสภาพไปเป็นเจล ต่อจากนั้นแข็งก็จะเริ่มแห้งและขยายตัวเนื่องจากไอน้ำที่อยู่ภายใน ทำให้โฟมขยายเต็มแม่แบบ ซึ่งในสถานะนี้จะเกิดความดันขึ้นเล็กน้อยทำให้ภายในแม่แบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้โฟมแห้งอย่างรวดเร็ว

ภาพจากกล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคปของ โฟมจากแข็งมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) จากภาพตัดขวางของ โฟมจากแข็งพบว่า บริเวณขอบส่วนบนและล่างของ โฟมจะมีความหนาแน่นสูงแต่เซลล์ของ โฟมจะมีขนาดเล็ก ในขณะที่ส่วนกลางของ โฟมจะมีความหนาแน่นต่ำแต่เซลล์ของ โฟมจะมีขนาดใหญ่ สาเหตุที่บริเวณขอบของ โฟมมีความหนาแน่นสูงอาจเนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ติดกับแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูง ทำให้ไอน้ำภายใน โฟมระเหยไปอย่างรวดเร็ว แต่เซลล์ของ โฟม ไม่สามารถขยายตัวได้มากนัก สำหรับส่วนกลางของ โฟมที่เซลล์มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด (Open cell) เนื่องจากไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั้นพยายามจะหาทางระบายออกจากเนื้อ โฟม เซลล์ของ โฟมจึงเกิดการขยายตัวและทำให้เซลล์แตกในที่สุด

ภาพจากกล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคปของคอมพอสิต โฟมที่ผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ คือพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนแสดงในรูปที่ 4.1(ข) 4.1(ค) และ 4.1(ง) ตามลำดับ จากภาพดังกล่าวพบว่าลักษณะของคอมพอสิต โฟมที่มีการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์มีความคล้ายคลึงกับลักษณะของ โฟมจากแข็งมันสำปะหลัง คือบริเวณขอบทั้งส่วนบนและล่างของคอมพอสิต โฟมจะมีความหนาแน่นสูง ในขณะที่ส่วนกลางของคอมพอสิต โฟมจะมีความหนาแน่นต่ำ แต่สำหรับคอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลค โทนจะมีเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่า โฟมจากแข็งมันสำปะหลังและคอมพอสิต โฟมอีก 2 ชนิด

จากการวัดความหนาแน่นของคอมพอสิต โฟมพบว่า โฟมจากแข็งมันสำปะหลังมีความหนาแน่น 0.138 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ในขณะที่คอมพอสิต โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30% มีความหนาแน่น 0.2250 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร คอมพอสิต โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิแลคติก แอซิด 30% มีความหนาแน่น 0.2170 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร และคอมพอสิต โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิคาโพรแลค โทน 30% จะมีความหนาแน่น 0.2042 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร จากความแตกต่างของความหนาแน่นดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าคอมพอสิต โฟมทั้งสามชนิดมีความหนาแน่นมากกว่า โฟมจากแข็งมันสำปะหลัง



ก



ข



ค



ง

รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังและคอมพอสิต โฟมจากกลีงสแกนนิ่ง อิเล็กตรอนไมโครสโคป (ก) โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30% (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด 30% และ (ง) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลกโตน 30%

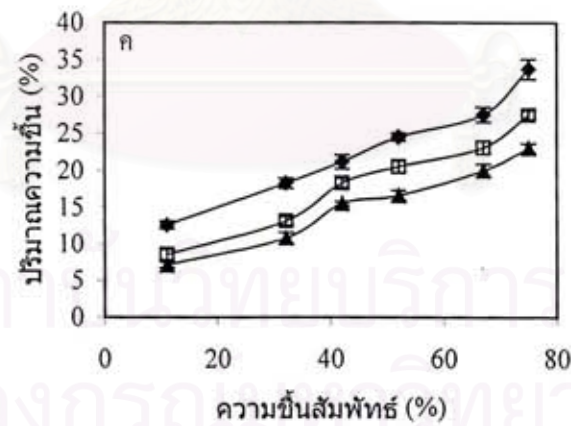
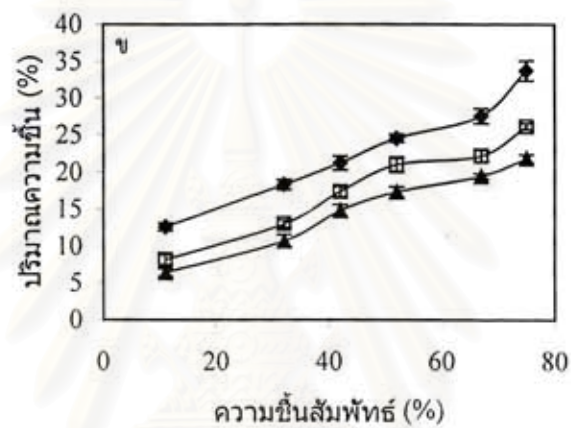
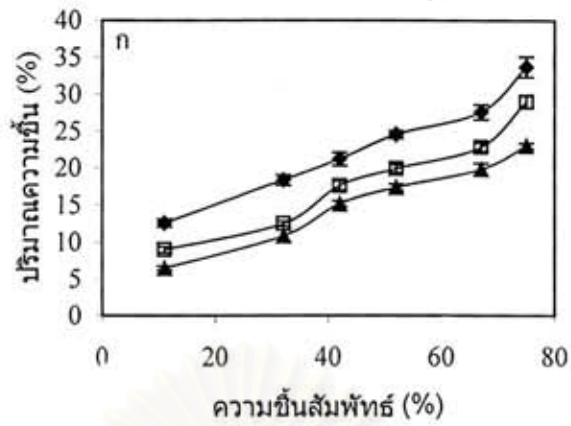
4.2 ปริมาณความชื้นในคอมพอลิโตนีโตน

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะในการเข้ากันได้ดีกับน้ำ (Hydrophilic property) ดังนั้น โฟมจากแป้งจึงมีความต้านทานต่อการดูดซับน้ำ (Water absorption) จำกัด ซึ่งทำให้โฟมจากแป้งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการวัดปริมาณความชื้นใน โฟมจึงมีความสำคัญมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของโฟม เช่น สมบัติเชิงกล น้ำหนักและความต้านทานต่อจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา¹⁸

จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณความชื้นใน โฟมจากแป้ง พบว่าปัจจัยดังกล่าว ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์และเวลาในการเก็บ โฟม ชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์สังเคราะห์และพลาสติกไซเซอร์ โดย Alexander และ Dresden¹⁹ ได้ศึกษาการวัดปริมาณการดูดซับน้ำของ โฟมจากแป้ง โดยพบว่าปริมาณความชื้นใน โฟมจากแป้งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ โฟม เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศสูงกว่า 85% โฟมจะมีปริมาณความชื้นในเนื้อ โฟมเพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัด ซึ่งจะทำให้ความคงรูปและสมบัติเชิงกลของ โฟมลดลง นอกจากนี้ Stenhouse²⁰ ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มเป่า (Blown film) ของคอมพอลิโตนีโตนระหว่างแป้งและพอลิเอธิลีน โกลไวนิล แอลกอฮอล์ โดยได้รายงานว่าสมบัติของฟิล์มแตกต่างกันไปตามปริมาณความชื้นในเนื้อฟิล์มและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ โดยเมื่อฟิล์มมีปริมาณความชื้นสูง ความแข็งแรงจะลดลง ในขณะที่เมื่อฟิล์มมีปริมาณความชื้นต่ำ ฟิล์มจะมีความยืดหยุ่นลดลง นอกจากนี้ความเปราะของฟิล์มยังขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บอีกด้วย

4.2.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอลิโตนีโตน

ผลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่อปริมาณความชื้นในคอมพอลิโตนีโตนที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนซึ่งทำให้สมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 7 วันที่ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 คอมพอลิโตนีโตนดังกล่าวจะมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โมเลกุลของน้ำในบรรยากาศจะถูกดูดเข้าไปในเนื้อของ โฟมและไม่สามารถเคลื่อน ไหวได้เนื่องจากถูกจับด้วยหมู่ที่มีขั้วของแป้ง ซึ่งในขั้นนี้โมเลกุลของน้ำจะเรียงตัวเป็นชั้นเดี่ยวอยู่ในเนื้อ โฟม แต่ในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น โมเลกุลของน้ำจะเรียงตัวเป็นสองและสามชั้น ทำให้ความชื้นใน โฟมมากขึ้นเรื่อย ๆ ค่าความชื้นของกราฟระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับปริมาณความชื้นใน โฟมมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

สำหรับคอมพอสิตโพลีเมอร์แข็งสำหรับหลัง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ แข็งสำหรับหลัง-พอลิแลคติก แอซิด และแข็งสำหรับหลัง-พอลิคาโพรแลค โทน ซึ่งแสดงในรูป 4.2(ก) 4.2(ข) และ 4.2(ค) ตามลำดับ พบว่าปริมาณความชื้นในโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติในการดูดซับความชื้น (Hygroscopic property) ของแข็งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยที่แข็งจะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ ดังนั้นเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิตโพลีเมอร์มากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณแข็งในคอมพอสิตโพลีเมอร์ลดลง ปริมาณความชื้นในโพลีเมอร์จึงลดลง

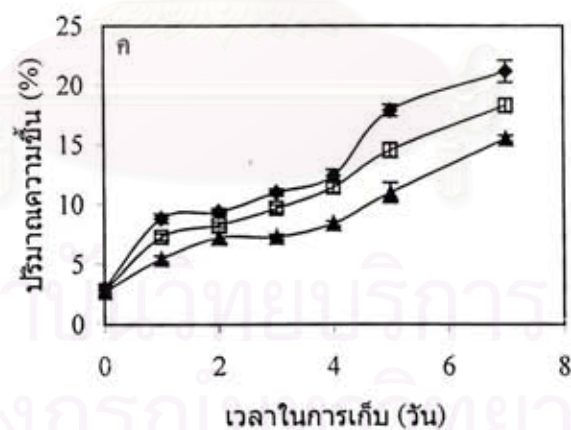
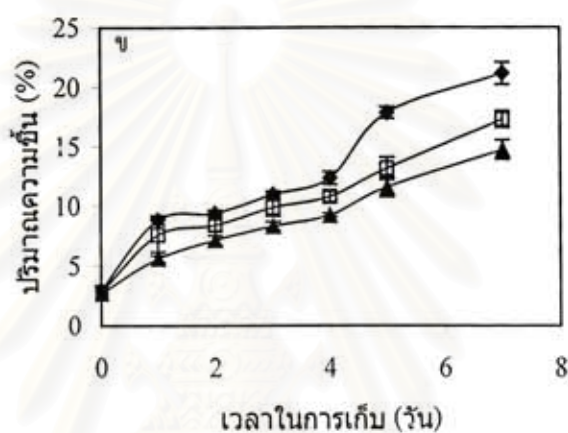
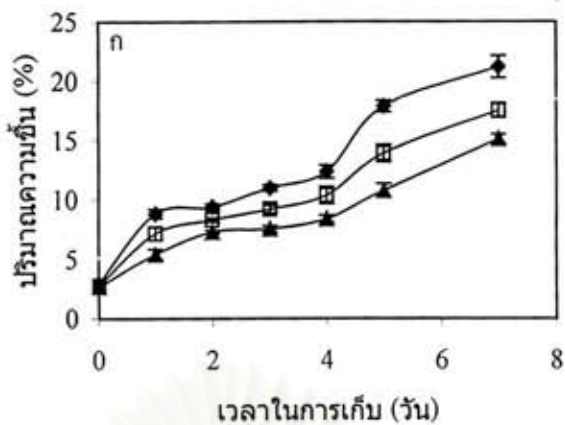
4.2.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโพลีเมอร์

ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นในคอมพอสิตโพลีเมอร์ที่มีพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนเป็นส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยพบว่าปริมาณความชื้นในคอมพอสิตโพลีเมอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บนานขึ้นในสภาวะที่ควบคุมให้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่

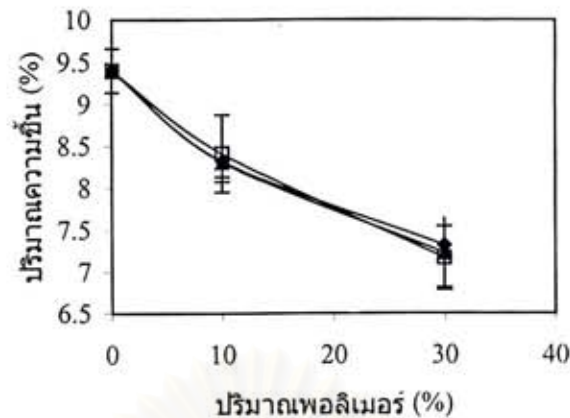
4.2.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโพลีเมอร์

ในหัวข้อนี้ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของโพลีเมอร์คือ ชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดย Lai และคณะ²¹ รายงานเมื่อปริมาณพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ในคอมพอสิตฟิล์มของไนลอน 4-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นในคอมพอสิตฟิล์มจะลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้ตรงกับงานของ Averous และคณะ¹⁷ ซึ่งรายงานว่าผลผสมแข็งเทอร์โมพลาสติกด้วยพอลิคาโพรแลค โทน จะทำให้แข็งเทอร์โมพลาสติกมีความต้านทานความชื้นมากขึ้น ส่วน Fang และ Hanna¹⁵ พบว่าโพลีเมอร์จากแข็งที่ส่วนผสมของพอลิแลคติก แอซิด ความต้านทานความชื้นของโพลีเมอร์จากแข็งก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโพลีเมอร์กับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิตโพลีเมอร์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าปริมาณความชื้นในคอมพอสิตโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิตโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อชนิดของพอลิเมอร์สังเคราะห์แตกต่างกัน ปริมาณความชื้นในคอมพอสิตโพลีเมอร์ลดลงไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับระยะเวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลค โทน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

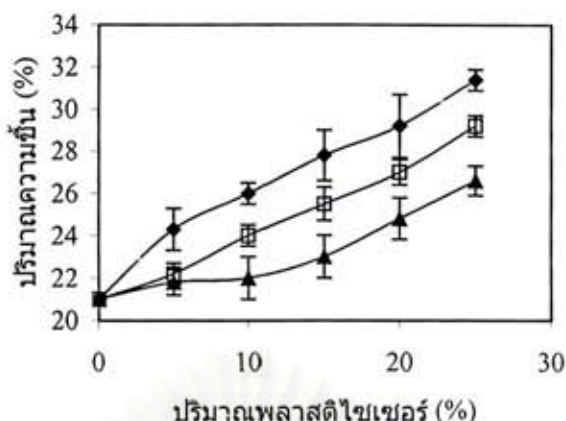


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วันของ (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน

4.2.4 ผลของพลาสติกไซเซอรต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟม

จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าการเติมพลาสติกไซเซอรชนิดต่าง ๆ ลงในแป้ง จะทำให้แป้งมีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดย Shogren²² รายงานว่าการใช้ยูเรียผสมกับไกลคอลชนิดต่าง ๆ จะเพิ่มความเหนียว (การยึดตัว) ของ gelatinized starch ได้มากกว่าการใช้ยูเรียเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Van Soest และ Knooren²³ ได้ศึกษาผลของกลีเซอรอลและปริมาณน้ำต่อสมบัติของแผ่นแป้งพลาสติก (Starch plastic sheets) โดยมีรายงานว่าปริมาณพลาสติกไซเซอรที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลและการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในแผ่นชิ้นงาน

ปริมาณความชื้นของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนผสมของกลีเซอรอล ยูเรีย หรือ แอมโมเนียม คลอไรด์ โดยการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วันดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่าโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นส่วนผสมจะมีปริมาณความชื้นในโฟมมากกว่าโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนผสมของยูเรียหรือแอมโมเนียม คลอไรด์ โดยโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนผสมของพลาสติกไซเซอรไม่ว่าจะเป็นกลีเซอรอล ยูเรีย หรือ แอมโมเนียม คลอไรด์ต่างก็มีปริมาณความชื้นในโฟมมากขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซอร์ในการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42 % นาน 7 วัน (◆) กลีเซอรอล (□) ยูเรียและ (▲) แอมโมเนียม คลอไรด์

4.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตโฟม

สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโฟมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโฟมและสภาวะในการเก็บ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และระยะเวลาในการเก็บ²⁴ สำหรับในส่วนขององค์ประกอบของโฟมนั้น Zhiqiang และคณะ²⁵ พบว่าการเติมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ลงไปในฟิล์มจากแป้งนั้นจะเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อสภาวะอากาศและความต้านทานความชื้นของฟิล์มได้ นอกจากนี้ Avella และคณะ²⁶ ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของคอมพอสิตของแป้งและพอลิคาโพรแลกโตนอีกด้วย ส่วน Fang และ Hanna¹⁵ รายงานว่าปริมาณพอลิแลคติก แอซิดมีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตโฟมระหว่างแป้งและพอลิแลคติก แอซิด โดยเมื่อปริมาณพอลิแลคติก แอซิดเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการรับแรงอัด (Compressibility) ของโฟมจะเพิ่มขึ้น โดยค่าความสามารถในการรับแรงอัดจะเพิ่มจาก 80.8% เป็น 90.4% เมื่อปริมาณพอลิแลคติก แอซิดในคอมพอสิตโฟมเพิ่มจาก 10% เป็น 30% นั้นหมายความว่า การเพิ่มปริมาณพอลิแลคติก แอซิดในคอมพอสิตโฟมจะทำให้โฟมมีความเป็นออสติกมากขึ้น

สำหรับกรณีผลของสภาวะในการเก็บของโฟมต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตโฟมนั้น Shogren¹³ พบว่าค่าแรงมากที่สุดที่คอมพอสิตโฟมของแป้งและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์จะรับได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเก็บ เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงหรือต่ำ โฟมจะมีความแข็งแรงมากที่สุด ในขณะที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50% โฟมจะมีความแข็งแรงลดต่ำลง นอกจากนี้ Van Soest และ Knooren²³ รายงานว่าค่าการบีบตัว ณ จุดขาดของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในสัปดาห์แรกของการเก็บ ในขณะที่ค่าโมดูลัสและการทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อ

เวลาในการเก็บเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 สัปดาห์ ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของโฟมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนค่าโมดูลัสมีค่าคงที่

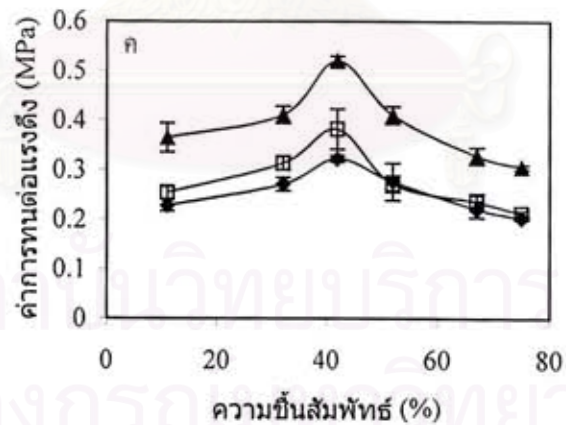
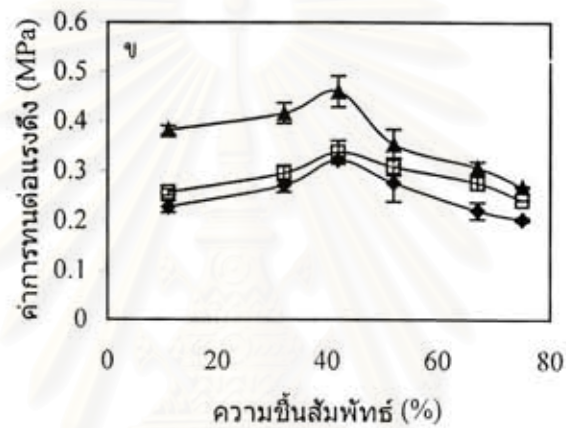
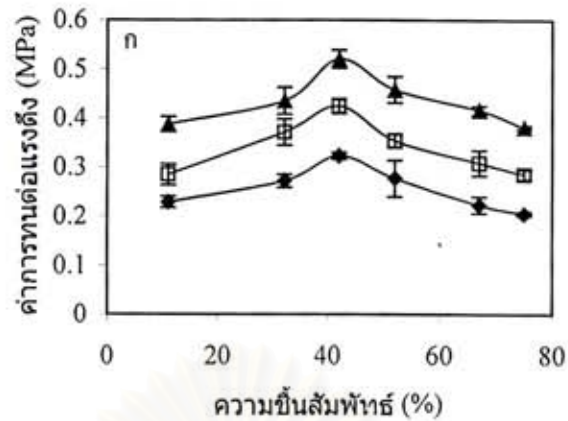
4.3.1 สมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของคอมพอสิต โฟมซึ่งประกอบไปด้วยสมบัติในการรับแรงดึงและแรงโค้งงอ โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบไปด้วยสภาวะในระหว่างการเก็บคือ ความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลาในการเก็บ รวมทั้งชนิดของพอลิเมอร์สังเคราะห์และพลาสติกไซเซอร์ที่เติมเป็นส่วนผสมในคอมพอสิต โฟม

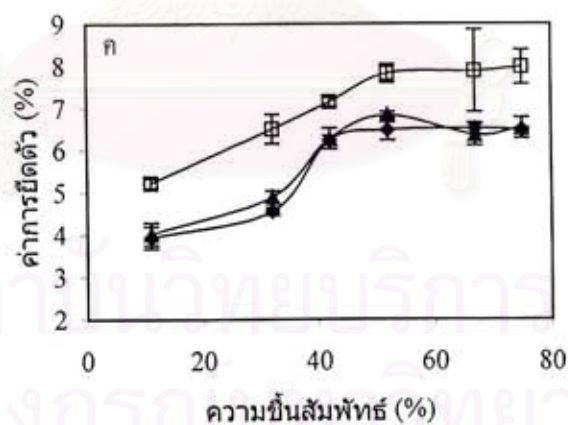
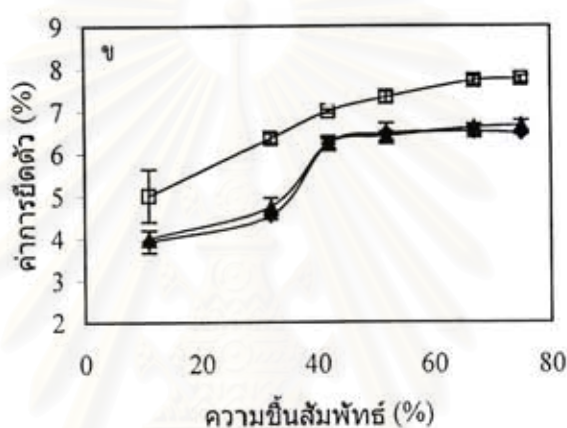
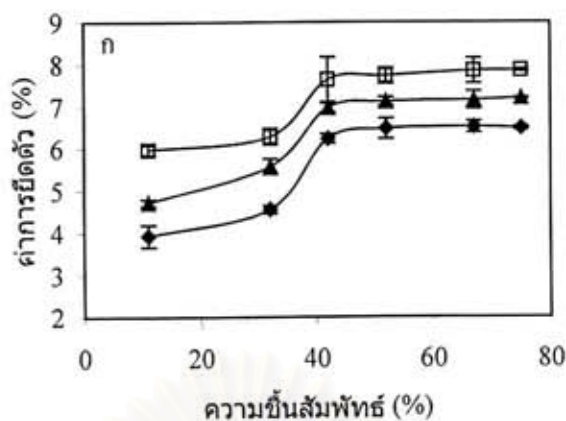
4.3.1.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

การศึกษาสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมนั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าการทนต่อแรงดึงและค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการเก็บภายใต้สภาวะที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กันเป็นเวลา 7 วันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จากผลการทดลองในรูปที่ 4.6 พบว่าคอมพอสิต โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์สังเคราะห์ ในที่นี้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลก โทนมีความสามารถในการรับแรงดึงได้มากที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% อาจเนื่องจากที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โฟมจะมีความเปราะและเกิดการแตกหักได้ง่ายทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง โฟมจะสามารถดูดซับน้ำได้มากทำให้โฟมมีความอ่อนตัวทำให้ความแข็งแรงลดลงเช่นกัน¹³ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงในแป้งมันสำปะหลังและส่วนผสมอื่น ๆ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปนั้น ทำให้คอมพอสิต โฟมมีค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมแสดงในรูปที่ 4.7 จากรูปพบว่าค่าการยึดตัว ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และค่าการยึดตัว ณ จุดขาดจะคงที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 42% การที่ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นนั้น เนื่องจากผลของโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปในเนื้อโฟม ซึ่งจะทำการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลแป้งเกิดได้ง่ายขึ้น²⁸



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมกับความขึ้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลกโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

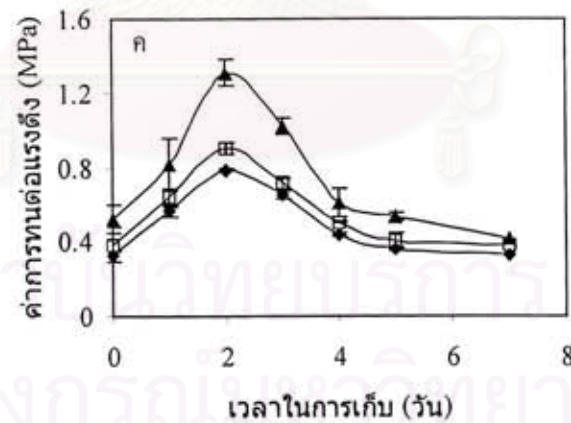
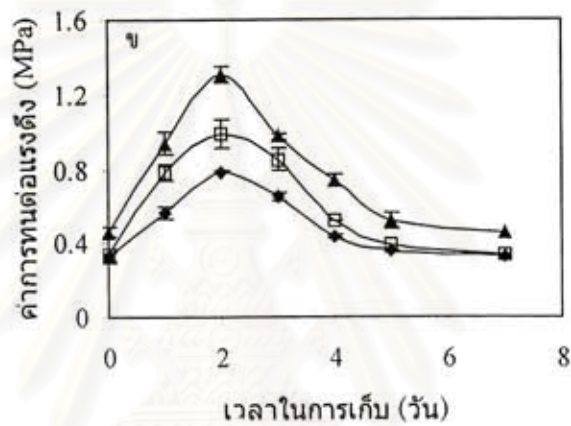
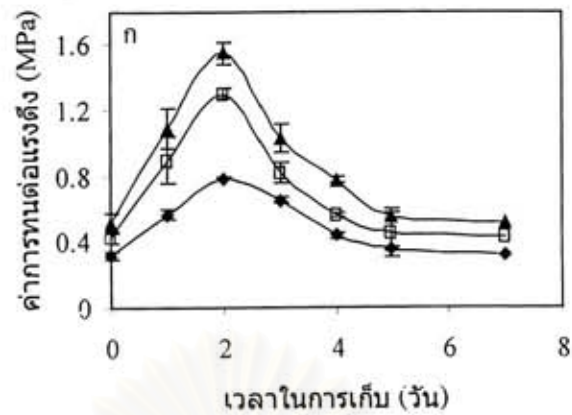


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดน้ำ ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

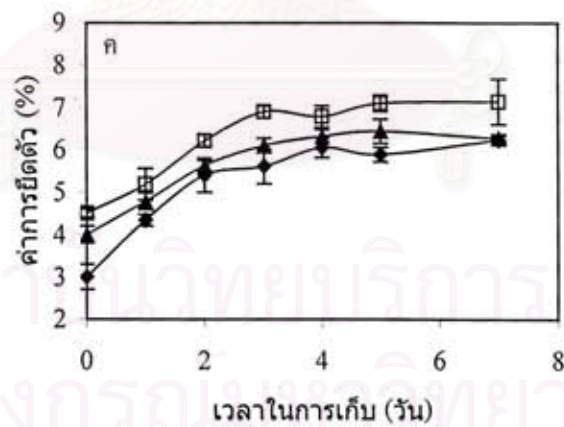
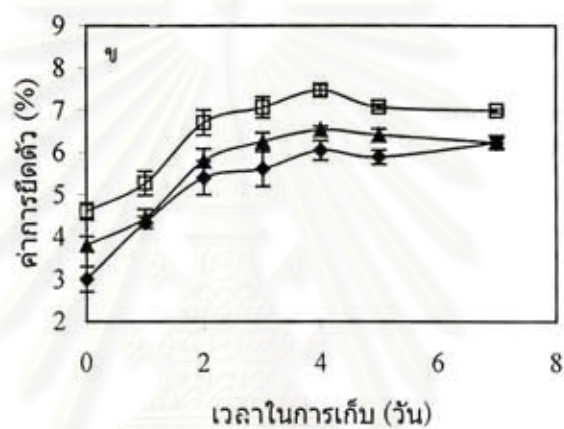
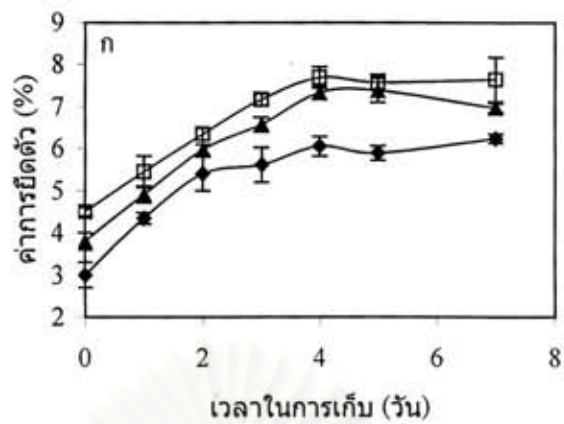
4.3.1.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

สมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมที่เก็บภายใต้สภาวะที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 42% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาในการเก็บต่าง ๆ แสดงดังรูป 4.8 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บคอมพอสิต โฟมภายใต้สภาวะที่กำหนดนาน 2 วัน คอมพอสิต โฟมจะมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงสุด ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจาก plasticizing effect ของความชื้นที่ถูกดูดซับในเนื้อโฟมที่เวลาดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เติมลงในคอมพอสิต โฟมระหว่าง 0% 10% และ 30% พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์มากขึ้น คอมพอสิต โฟมจะมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลก โทน พบว่าต่างก็มีค่าการทนต่อแรงดึงมากกว่าแป็งอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังกล่าวจึงเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอมพอสิต โฟมด้วย^{15,17,27}

ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมของแป็งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แสดงดังรูป 4.9 จากผลดังกล่าวพบว่าคอมพอสิต โฟมจะมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดมากขึ้นอย่างมากภายในระยะเวลา 4 วันของการเก็บ แต่ภายหลังจาก 4 วัน ไปแล้วนั้นค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว สาเหตุที่คอมพอสิต โฟมมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงในช่วงระยะเวลา 4 วัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของความชื้นภายในเนื้อโฟมในส่วนที่เป็นแป็งในระหว่างการเก็บ²⁰ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิต โฟมระหว่าง 0% 10% และ 30% พบว่าค่าการยึดตัว ณ จุดขาดมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของแป็งจะมีค่าต่ำกว่าค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพราะ โฟมจากแป็งมีความเปราะมากกว่าพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลก โทน^{15,17,27} และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดเดียวกันที่ 10% และ 30% พบว่าค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมที่มีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% จะมีค่าสูงกว่าคอมพอสิต โฟมที่มีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ 30% เนื่องจาก โฟมจากแป็งจะมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเติมพอลิเมอร์ลงไปเป็นส่วนผสมทำให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมลดลง



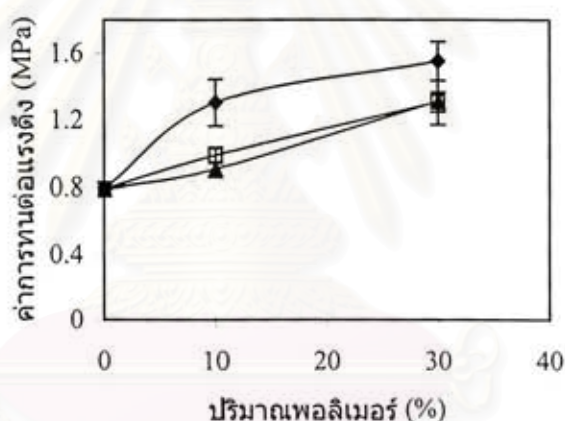
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิตโฟมกับระยะเวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% (ก) คอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยัดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมกับระยะเวลาในการเก็บ ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% (ก) คอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโทน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

4.3.1.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

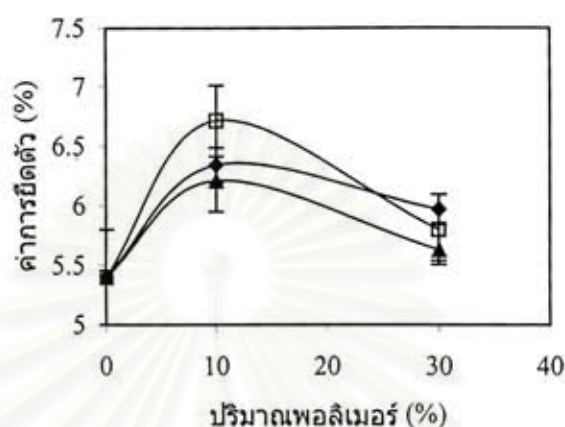
รูป 4.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิตและการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน พบว่าคอมพอสิต โฟมมีค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิต โฟมมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าการทนต่อแรงดึงของแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้งสามชนิดพบว่า แป้ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนมียค่าการทนต่อแรงดึงเป็น 22 เมกกะพาสกาล 95 เมกกะพาสกาล 44 เมกกะพาสกาลและ 33 เมกกะพาสกาลตามลำดับ จากค่าดังกล่าวพบว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้งสามชนิดมีค่าการทนต่อแรงดึงมากกว่าแป้ง ดังนั้นการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงในคอมพอสิต โฟมจึงเป็นการเพิ่มการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟม ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Averous และคณะ¹⁷ ที่ได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณพอลิคาโพรแลคโทนจะทำให้การทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโทน

ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการบิดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เติมในคอมพอสิต โฟมดังกล่าว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าการบิดตัว ณ จุดขาดของ โฟมจากแป้งกับคอมพอสิต โฟมที่เติมพอลิเมอร์สังเคราะห์พบว่าคอมพอสิต โฟมจะมีค่าการบิดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า และคอมพอสิต โฟมที่มีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% จะมีค่าการบิดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด อาจเนื่องจากคอมพอสิต โฟมมีค่าความแข็งแรงมาก

ขึ้นเมื่อมีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang และ Hanna¹⁵ ซึ่งได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณพอลิแลคติก แอซิดในคอมพอสิต โฟมจะทำให้คอมพอสิต โฟมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ภายใต้การเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน

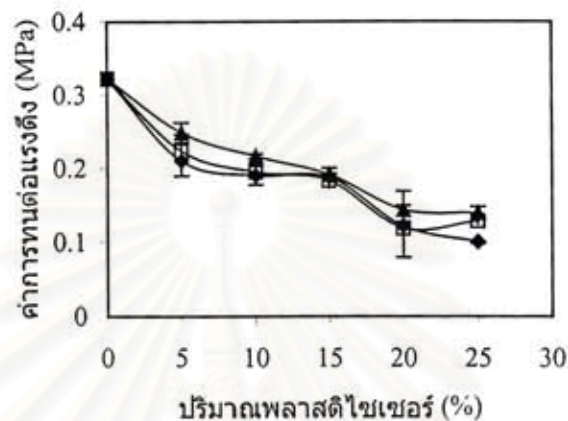
4.3.1.4 ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

การนำเอาพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ นั้นถ้าหากมีพลาสติกไซเซอร์ผสมอยู่ด้วยนั้น พลาสติกจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ยูเรียและแอม โมเนียม คลอไรด์ที่เติมลงในโฟมจากแป้งต่อสมบัติด้านการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟม

ในการศึกษาสมบัติในการรับแรงดึงของคอมพอสิต โฟมนั้น คอมพอสิตจะต้องผ่านการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน โดยนำผลที่ได้มีเขียนกราฟระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของโฟมจากแป้งกับปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงในโฟมดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการทนต่อแรงดึงของโฟมจากแป้งจะลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์ในโฟมจากแป้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์แทรกเข้าไปในเนื้อแป้งและทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแป้งความแข็งแรงจึงลดลง ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiugao และคณะ²⁸ ซึ่งศึกษาสมบัติของแป้งที่ผสมกับกลีเซอรอล และพบว่ากลีเซอรอลทำหน้าที่เป็น

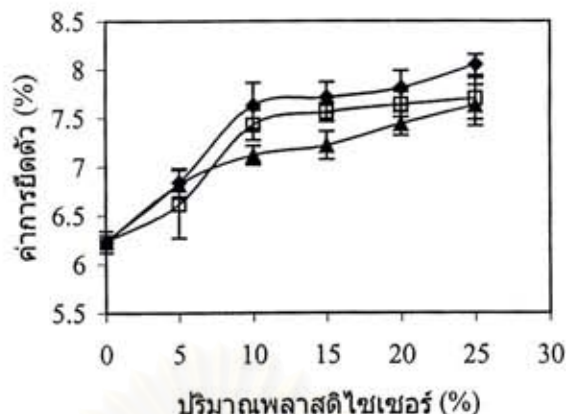
พลาสติกไซเซอรให้กับแป้ง โดย โมเลกุลของกลีเซอรอลจะแทรกเข้าไปในชั้นของแป้งและทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลของแป้ง ซึ่งผลดังกล่าวทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งลดลง เป็นผลทำให้การทนต่อแรงดึงของแป้งลดลงไปด้วย นอกจากนี้ยังได้รายงานอีกว่าเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรเพิ่มขึ้น การทนต่อแรงดึงของวัสดุดังกล่าวก็จะลดลงด้วย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดึงของโพลิโพรพิลีนจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน (◆) กลีเซอรอล (□) ยูเรีย และ (▲) แอม โมเนียม คลอไรด์

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อชนิดของพลาสติกไซเซอรเปลี่ยนจากกลีเซอรอลเป็นยูเรียหรือแอม โมเนียม คลอไรด์ ค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิต โฟมไม่แตกต่างกันมากนัก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัว ณ จุดขาดกับปริมาณพลาสติกไซเซอรที่เติมลงในคอมพอสิต โฟมแสดงดังรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต โฟมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรเพิ่มขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าการเติมพลาสติกไซเซอรจะช่วยเพิ่มค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ได้ สาเหตุที่คอมพอสิต โฟมมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้นนั้นเนื่องมาจากพลาสติกไซเซอรจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแป้งทำให้แรงในการยึดเกาะกันของโมเลกุลของแป้งลดลง การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงเกิดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน (◆) กลีเซอรอล (□) ยูเรียและ (▲) แอมโมเนียม คลอไรด์

4.3.2 สมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

4.3.2.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

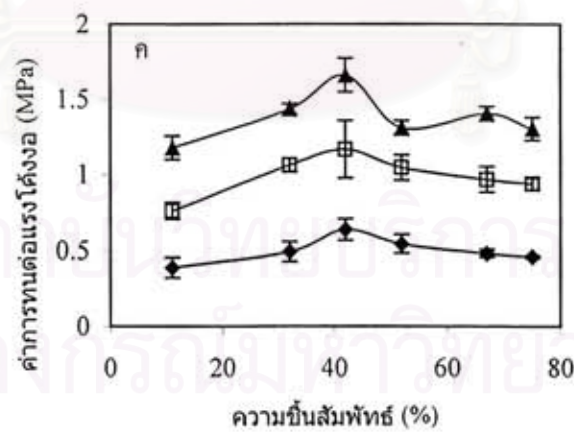
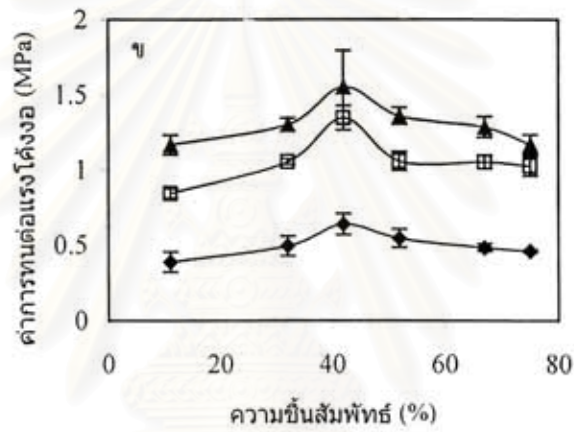
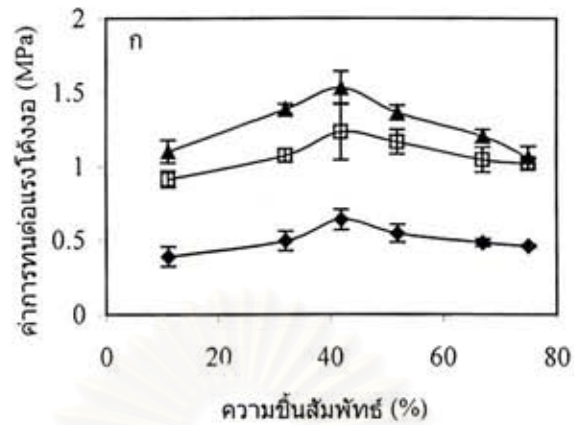
การศึกษาสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมนั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าการทนต่อแรงโค้งงอและค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการเก็บภายใต้สภาวะที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กันเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากผลการทดลองในรูปที่ 4.14 พบว่าคอมพอสิต โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์สังเคราะห์ ในที่นี้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลคโตนมีความสามารถในการรับแรงโค้งงอได้มากที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% ซึ่งผลที่ได้นี้มีแนวโน้มเดียวกับสมบัติในการรับแรงดึง อาจเนื่องจากที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โฟมจะมีความเปราะและเกิดการแตกหักได้ง่ายทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง โฟมจะสามารถดูดซับน้ำได้มากทำให้โฟมมีความอ่อนตัวทำให้ความแข็งแรงลดลงเช่นกัน¹³ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงในแป้งมันสำปะหลังและส่วนผสมอื่น ๆ แล้วนำไปขึ้นรูปนั้นทำให้คอมพอสิต โฟมมีค่าการทนต่อแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมแสดงในรูปที่ 4.15 จากรูปพบว่าค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอจะคงที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 42% การที่ค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นนั้น เนื่องจากผลของโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปในเนื้อโฟม ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบ่งเกิดได้ง่ายขึ้น²⁸

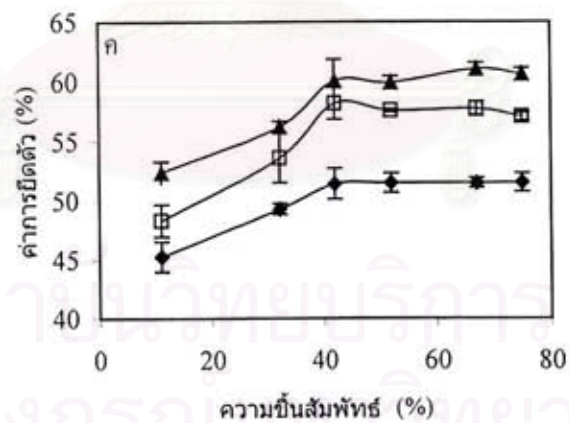
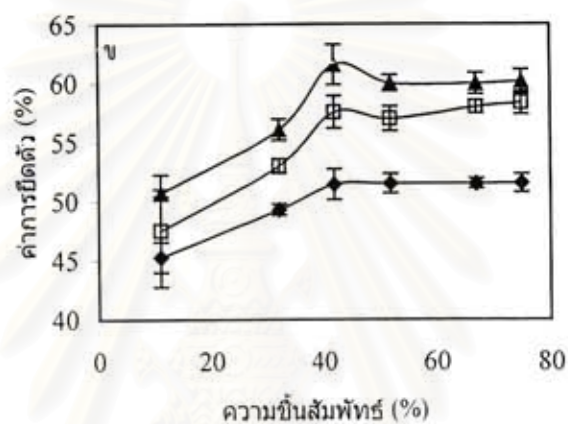
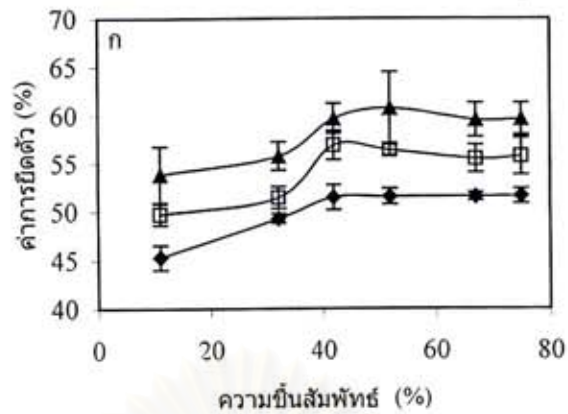
4.3.2.2 ผลของเวลาในการเก็บต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

สมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมที่เก็บภายใต้สภาวะที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 42% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาในการเก็บต่าง ๆ แสดงดังรูป 4.16 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บคอมพอสิตโฟมภายใต้สภาวะที่กำหนดนาน 2 วัน คอมพอสิตโฟมจะมีความสามารถในการทนต่อแรงโค้งงอสูงสุด ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจาก Plasticizing effect ของความชื้นที่ถูกดูดซับในเนื้อโฟมที่เวลาดังกล่าว ทำให้การทนต่อแรงโค้งงอเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากมีความชื้นในเนื้อโฟมมากเกินไปก็จะทำให้โฟมมีความแข็งแรงลดลง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้เวลาในการเก็บโฟมมากกว่า 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เติมลงในคอมพอสิตโฟมระหว่าง 0% 10% และ 30% พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์มากขึ้น คอมพอสิตโฟมจะมีความสามารถในการรับแรงโค้งงอมากยิ่งขึ้น เนื่องจากทั้งพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลคโตนต่างก็มีความยืดหยุ่นมากกว่าเป็งอยู่แล้ว^{13,15,26}

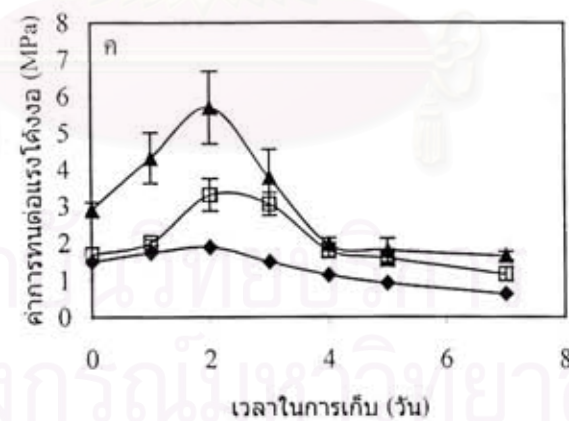
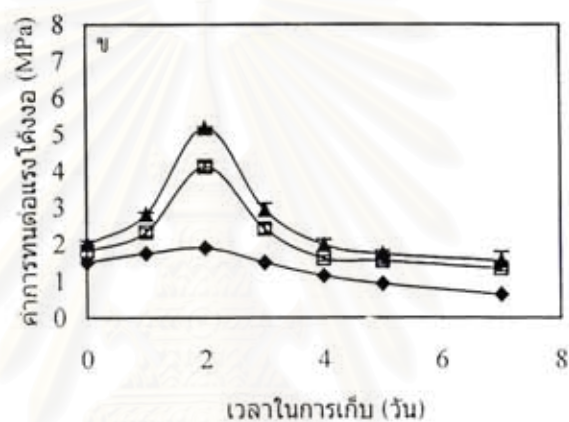
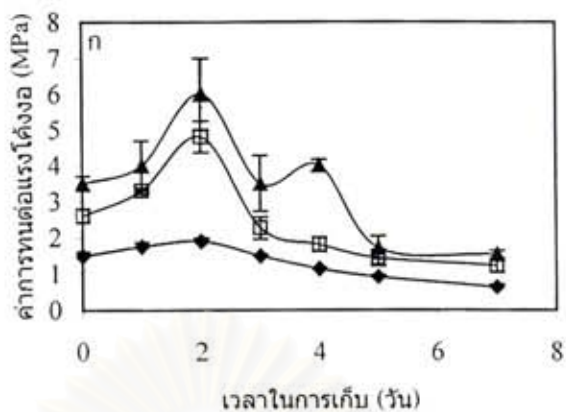
ค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมของเป็งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แสดงดังรูป 4.17 จากผลดังกล่าวพบว่าคอมพอสิตโฟมจะมีค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอเพิ่มมากขึ้นอย่างมากภายในระยะเวลา 4 วันของการเก็บ แต่ภายหลังจาก 4 วันไปแล้วนั้นค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว สาเหตุที่คอมพอสิตโฟมมีค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอในช่วงระยะเวลา 4 วัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของความชื้นภายในเนื้อโฟมในส่วนที่เป็นเป็งในระหว่างการเก็บ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิตโฟม พบว่าค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น



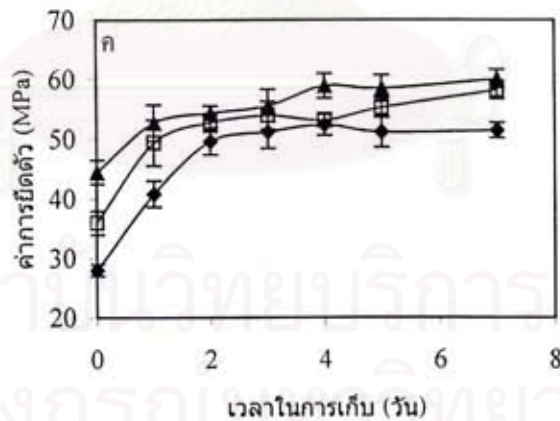
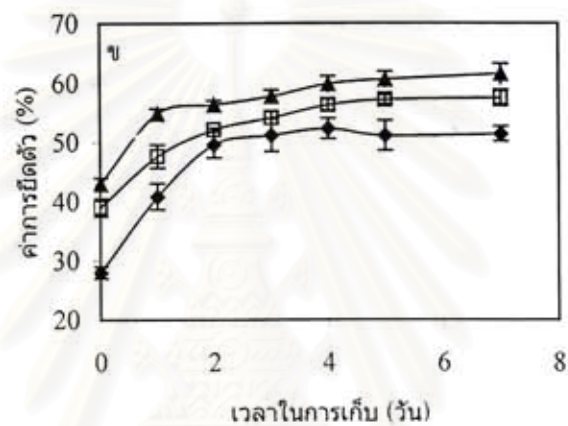
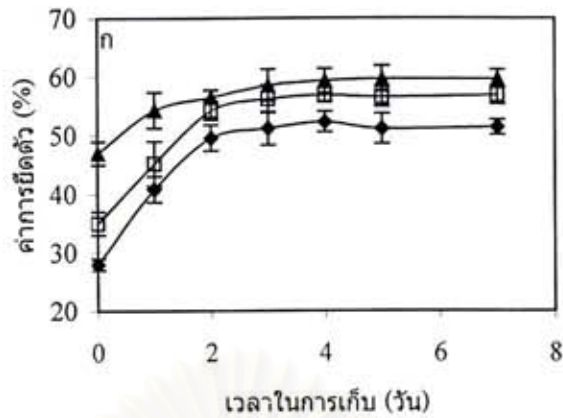
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบีบตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโทน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%



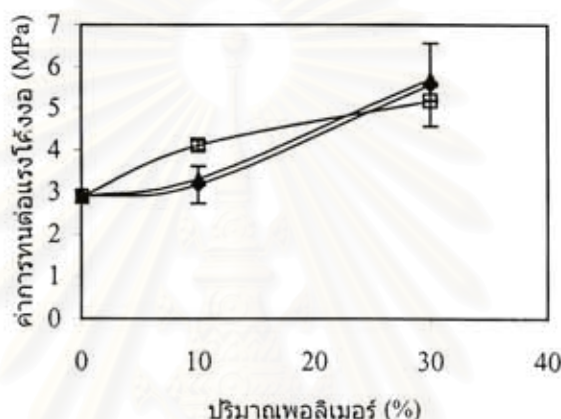
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งของคอมพอสิต โฟมกับเวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% (ก) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโทน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมกับเวลาในการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 42% (ก) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (ค) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโตน: (◆) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 0% (□) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 10% และ (▲) พอลิเมอร์สังเคราะห์ 30%

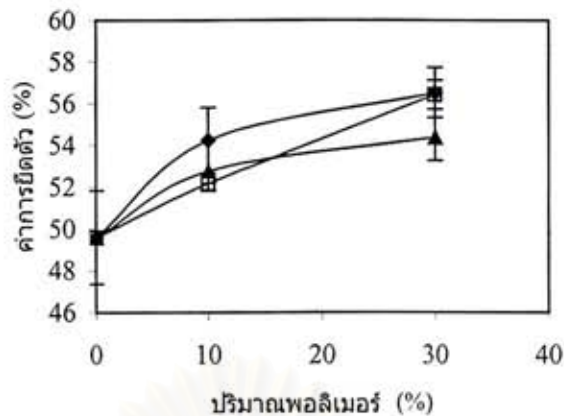
4.3.2.3 ผลของพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

รูป 4.18 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิต โฟมและการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมที่ผ่านการเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน พบว่าคอมพอสิต โฟมมีค่าการทนต่อแรง โค้งงอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ในคอมพอสิต โฟมมากขึ้น เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้งสามชนิดพบ พอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนมีความแข็งแรงมากกว่าแป้ง ดังนั้นการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงในคอมพอสิต โฟมจึงเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอมพอสิต โฟมจากแป้ง^{15,17,27}



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ภายใต้การเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลคโทน

ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เติมในคอมพอสิต โฟมดังกล่าว จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของ โฟมจากแป้งกับคอมพอสิต โฟมที่เติมพอลิเมอร์สังเคราะห์พบว่า คอมพอสิต โฟมจะมีค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอสูงกว่า และคอมพอสิต โฟมที่มีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ 30% จะมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงสุด อาจเนื่องจากคอมพอสิต โฟมมีค่าความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang และ Hanna¹⁵ ซึ่งได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณพอลิแลคติก แอซิดในคอมพอสิต โฟมจะทำให้คอมพอสิต โฟมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมกับ ปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 2 วัน (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลกโตน

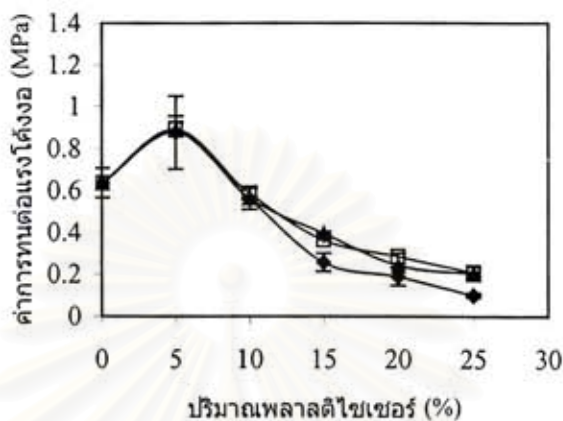
4.3.2.4 ผลของพลาสติกไซเซอรต์ต่อสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

ในการศึกษาสมบัติในการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมนั้น คอมพอสิต โฟมจะต้องผ่านการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน โดยนำผลที่ได้มีเขียนกราฟระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของโฟมจากแป้งกับปริมาณพลาสติกไซเซอรต์ที่เติมลงใน โฟม ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.20

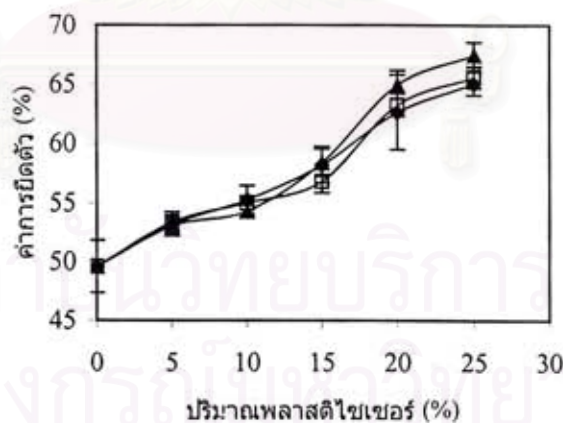
จากรูปที่ 4.20 พบว่าการทนต่อแรงโค้งงอของ โฟมจากแป้งจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณ พลาสติกไซเซอรต์เป็น 5% แต่เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรต์มากกว่า 5% ค่าการทนต่อแรงโค้งงอจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกไซเซอรต์แทรกเข้าไปในเนื้อแป้งและทำลายพันธะไฮโดรเจนของ โมเลกุลแป้งความแข็งแรงจึงลดลง²⁸

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอกับปริมาณพลาสติกไซเซอรต์ที่เติมลงในคอมพอสิต โฟมแสดงดังรูปที่ 4.21 จากรูปพบว่าค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรต์เพิ่มขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าการเติม พลาสติกไซเซอรต์จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นพอลิเมอร์ได้ สาเหตุที่คอมพอสิต โฟมมีค่าการยืดตัวสูงสุด เนื่องจากแรงโค้งงอมากขึ้นนั้นเนื่องจากพลาสติกไซเซอรต์ไปทำลายพันธะไฮโดรเจนของ โมเลกุลแป้ง ทำให้แรงในการยึดเกาะกันของ โมเลกุลของแป้งลดลง การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึง เกิดได้ง่ายขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้เมื่อชนิดของพลาสติกไซเซอรเปลี่ยนแปลงจากกลีเซอรอลเป็นยูเรียหรือแอมโมเนียม คลอไรด์ พบว่าค่าการทนต่อแรงโค้งงอและค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิต โฟมไม่แตกต่างกันมากนัก



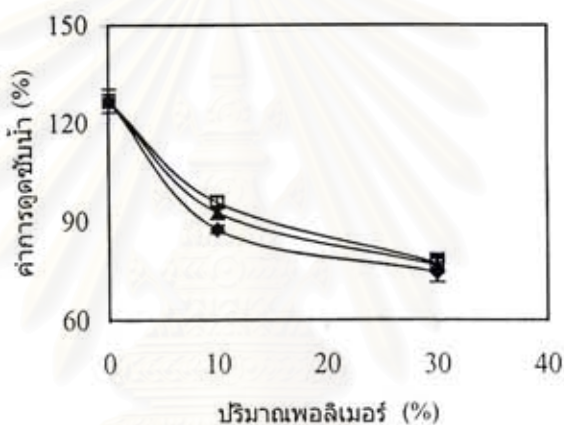
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงโค้งงอของ โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน (◆) กลีเซอรอล (□) ยูเรียและ (▲) แอมโมเนียม คลอไรด์



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงโค้งงอของ โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีพอลิเมอร์สังเคราะห์กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรภายหลังการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% นาน 7 วัน (◆) กลีเซอรอล (□) ยูเรียและ (▲) แอมโมเนียม คลอไรด์

4.4 สมบัติการดูดซับน้ำของคอมพอสิตโฟม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิตโฟมจากแป้งที่มีการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ข่อยสลายได้กับปริมาณพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยพบว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับในโฟมจะมีปริมาณน้อยลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Shogren และคณะ¹⁵ ที่รายงานว่าค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิตโฟมจากแป้งที่มีการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะลดลง เมื่อปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ใน โฟมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความเป็นผลึกสูงและไม่ละลายในน้ำเย็น นอกจากนี้ Fang และ Hanna¹⁵ ยังได้รายงานอีกว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index) ของคอมพอสิต โฟมจากแป้งที่มีการเติมพอลิแลคติก แอซิดจะลดลงเมื่อปริมาณพอลิแลคติก แอซิดเพิ่มขึ้น



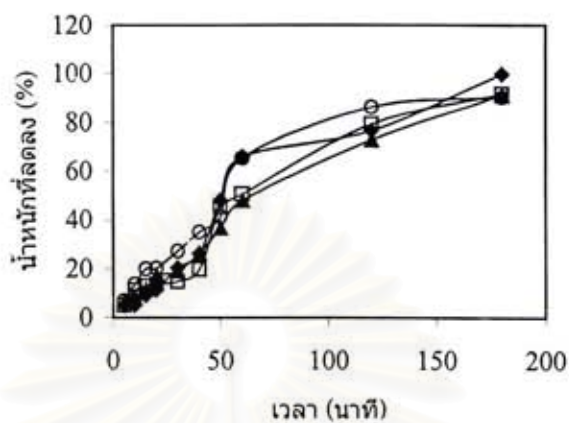
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิต โฟมกับปริมาณ พอลิเมอร์สังเคราะห์ (◆) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก แอซิด และ (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลคติก

4.5 การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิตโฟม

การศึกษาสมบัติการสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิตโฟมในงานวิจัยนี้ เอนไซม์ที่เลือกใช้คือ เอนไซม์ α -อะไมเลส ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้การวิจัยการศึกษาการสลายตัวของคอมพอสิตโฟมด้วยเอนไซม์ก็คือ เป็นวิธีที่ง่าย ได้ผลเร็วและสารที่ได้จากการสลายตัวสามารถนำไปวิเคราะห์ได้โดยไม่มีผลเนื่องจากตัวแปรอย่างอื่น²⁹

การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิตโฟมแสดงในรูป 4.23 โดยน้ำหนักที่หายไปของคอมพอสิตโฟมจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์สังเคราะห์เพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณน้ำหนักที่หายไปแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยกับ โฟมจากแป้งเพียงอย่าง

เดี่ยว จากผลที่ได้นี้อาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติที่เติมลงไปในคอมพอสิต โฟมมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสลายตัวของแป้ง



รูปที่ 4.23 การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ α -อะไมเลสของคอมพอสิต โฟมที่ 55 องศาเซลเซียส (◆) โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง (□) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30% (▲) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิแลกติก แอซิด 30% และ (○) คอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิคาโพรแลกโตน 30%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป

การนำเอาแป้งมาประยุกต์ใช้ในงานประเภท โฟมนั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากข้อด้อยบางประการของแป้ง เช่น ความเปราะ โฟมจากแป้งจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อความชื้นในเนื้อโฟมต่ำ และโฟมจากแป้งมีความต้านทานต่อความชื้นต่ำซึ่งจะทำให้โฟมเสียรูปทรงได้ง่ายเมื่อมีปริมาณความชื้นในเนื้อโฟมสูงขึ้น การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติก แอซิดและพอลิคาโพรแลค โทนลงใน โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่าสามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของคอมพอสิต โฟมได้โดยไม่ทำให้ความสามารถในการสลายตัวตามธรรมชาติของแป้งเปลี่ยนไป โดยคอมพอสิต โฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ จะมีสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบคอมพอสิต โฟมของแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์อีกสองชนิด นอกจากนี้การเติมพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลีเซอรอล ยูเรียและแอมโมเนียม คลอไรด์จะเพิ่มความยืดหยุ่นของ โฟมมากขึ้น

สมบัติเชิงกลและปริมาณความชื้น ในคอมพอสิต โฟมจากแป้งจะขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลาในการเก็บ จากผลที่ได้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คอมพอสิต โฟมมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือ ความชื้นสัมพัทธ์ 42 เปอร์เซ็นต์ ที่ 25 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเก็บนาน 2 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

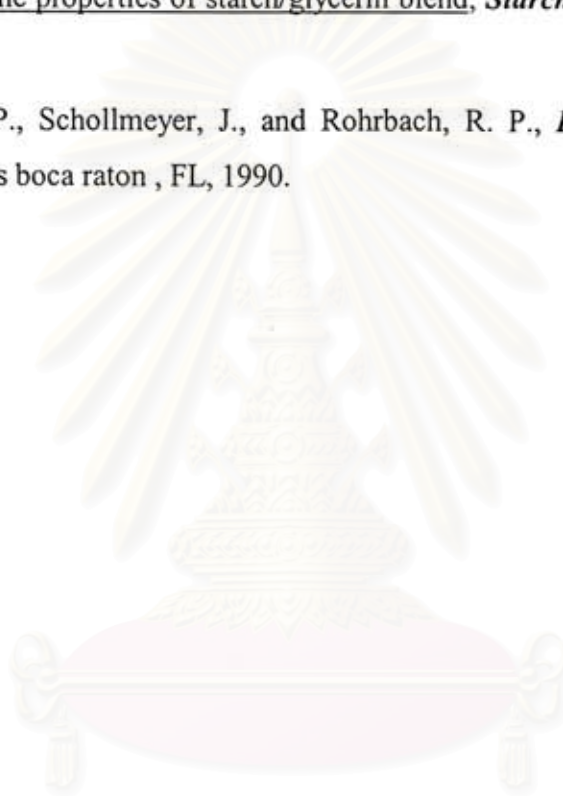


ส่วนอ้างอิง

1. พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, *พลาสติก*, ห.จ.ก.ป.สัมพันธ์พาณิชย์, พิมพ์ครั้งที่ 14, 2540
2. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd, John Wiley and Sons, 1990.
3. Tui V. *et al.*, *Biobased Packaging Materials for The Food Industry: Status and Perspectives*, C. J. Weber, ed., 2000.
4. Averous, L., Fauconnier, N., Moro, L., and Fringant, C., Blends of thermoplastic starch and polyestamide: processing and properties, *Journal of applied polymer science*, 76, p. 1117-1128 (2000).
5. Shogren, R. L., Lawton, J. W., Doane, W. M., and Tiefenbacher, K. F., Structure and morphology of baked starch foams, *Polymer*, 39, p. 6649-6655 (1998).
6. Tiefenbacher, K. F., *Journal of macromolecular science, pure applied chemistry*, A30, p. 727-731 (1993).
7. สายสนม ประดิษฐ์กวงและงามทิพย์ ภู่วโรดม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, องค์ประกอบย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง, เลขที่คำขอสิทธิบัตร 037125, 2541.
8. งามทิพย์ ภู่วโรดมและสายสนม ประดิษฐ์กวง, นายธีระ สุตะบุตร, องค์ประกอบย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งที่ปรับปรุงให้ดีขึ้น, เลขที่คำขอสิทธิบัตร 050546, 2544.
9. Ishida, H., *Polymer Composite Processing*, Case Western Reserve University.
10. เอกสารของกองตรวจสอบและมาตรฐานสินค้า กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์, 2545.
11. Bhatnagar, C., and Hanna, M. A., Properties of extruded starch-based plastic foam, *Industrial crops and product*, 4, p. 71-77 (1995).
12. Bastiotti, C., Cerutti, A., Guanella, I., Romano, G. C., and Toosin, M., Physical state and biodegradation behavior of starch-polycaprolactone systems, *Journal of environmental polymer degradation*, 3, p. 81-95 (1995).
13. Shogren, R. L., Lawton, J. W., Chen, L., and Tiefenbacher, K. F., Starch-poly(vinyl alcohol) foamed articles prepared by a baking process, *Journal of applied polymer science*, 68, p. 2129-2140 (1998).

14. Wang, L., and Shogren, R. L., Preparation and properties of corn starch-based loose fill foams, *In Proc. 6th Ann. Meeting of the Bio/Environmental degradation polymer science. The society: St. Paul. MN.* (1997).
15. Fang, Q., and Hanna, M. A., Functional properties of polylactic acid starch-based loose-fill packing foams, *Cereal Chemistry*, 77, p. 779-783 (2000).
16. Koenig, M. F., and Huang, S. J., Biodegradable blends and composites of polycaprolactone and starch derivatives, *Polymer*, 36, p. 1877-1882 (1995).
17. Averous, L., Moro, L., Dole, P., and Fringant, C., Properties of thermoplastic blends: starch-polycaprolactone, *Polymer*, 41, p. 4157-4167 (2000).
18. Liebenspacer, F., and Weisser, H., Sorptionsisothermen von papier und zellglas, *Verpackungs-Rdsch*, 40, p. 6-10 (1987).
19. Alexander, T., and Dresden, L. L., Water vapor sorption determination of starch based porous packaging materials, *Starch/strake*, 52, p. 53-57 (2000).
20. Stenhouse, P. J., Ratto, J. A., and Schneider, N. S., Structure and properties of starch/poly(ethylene-co-vinyl alcohol) blown films, *Journal of applied polymer science*, 64, p. 2613-2622.(1997).
21. Lai, J. Y., Chen, Y. C., and Hsu, K. Y., Nylon 4/PVA blend membrane for dialysis, *Journal of applied polymer science*, 73, p. 1795-1840 (1991)
22. Shogren, R. L., Swanson, C. L., and Thompson, A. R., Extrudates of cornstarch with urea and glycerol: structure/mechanical property relations, *Starch/strake*, 44, p. 335-338 (1992).
23. Van Soest, J. G., and Knooren, N., Influence of glycerol and water content on the structure and properties of extruded starch plastics sheets during aging, *Journal of applied polymer science*, 64, p. 1411-1412 (1997).
24. Roberta, A., Salvatore, I., and Luigi, N., Synthesis and characterization of starch-based polyurethane foams, *Journal of applied polymer science*, 68, p. 739-745 (1998).
25. Zhiqiang, L., Yi, F., and Xiao-Su, Y., Thermoplastic starch/PVA compounds: preparation p rocessing, and p roperties, *Journal of applied polymer science*, 74, p. 2667-2673 (1999).

26. Avella, M., Errico, M. E., Laurienzo, P., Martuscelli, E., Raimo, M., and Rimedio, R., Preparation and characterization of compatibilised polycaprolactone/starch composites, *Polymer*, 41, p. 4157-4167 (2000).
27. Chang-Hyeon, K., Eui-Jun, C., and Jung-Ki, P., Effect of PEG molecular weight on the tensile, toughness of starch/PCL/PEG blends, *Journal of applied polymer science*, 77, p. 29049-2056 (2000).
28. Jingao, Y., Songzhe, C., Jinanping, G., Huawu, Z., Jie, Z., and Tanjin, T. L., A study on the properties of starch/glycerin blend, *Starch/strike*, 50, p. 246-250 (1998).
29. Allenza, P., Schollmeyer, J., and Rohrbach, R. P., *Degradation materials*, CRC Press boca raton , FL, 1990.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนผนวก

ก. ปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ก.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของโฟมจากแป้ง

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	12.48	12.61	11.92	13.39	12.45	12.57	0.52
32	17.25	18.34	18.95	18.88	17.96	18.27	0.70
42	21.62	20.26	21.91	21.98	20.05	21.17	0.93
52	24.99	24.66	24.06	24.02	25.12	24.57	0.51
67	27.52	26.90	29.29	26.83	27.22	27.55	1.01
75	33.81	35.93	33.57	32.40	32.79	33.70	1.37

ตารางที่ ก.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	8.57	8.66	8.74	9.37	9.39	8.95	0.40
32	11.87	12.38	12.93	11.60	13.38	12.43	0.73
42	18.10	17.46	17.90	16.47	17.59	17.51	0.63
52	20.41	20.16	20.02	19.14	19.43	19.84	0.53
67	22.80	22.16	22.82	22.54	23.72	22.81	0.57
75	28.48	29.71	28.45	28.07	30.02	28.95	0.86

ตารางที่ ก.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	6.34	6.11	6.85	6.35	6.48	6.42	0.27
32	11.65	10.71	11.04	9.38	11.11	10.78	0.86
42	15.21	14.75	15.67	15.01	14.75	15.08	0.38
52	17.27	16.53	17.64	17.27	17.67	17.27	0.45
67	20.03	20.93	18.57	19.52	19.71	19.75	0.85
75	23.19	22.94	22.33	23.29	23.07	22.96	0.38

ตารางที่ ก.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก
แอซิด 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	8.68	8.22	7.99	7.05	8.57	8.11	0.65
32	12.95	13.55	12.72	12.36	13.28	12.97	0.47
42	16.35	17.17	17.54	18.31	17.21	17.31	0.71
52	20.53	19.55	20.90	21.35	22.36	20.94	1.03
67	22.45	22.21	23.08	20.92	22.08	22.15	0.79
75	25.77	27.65	25.02	26.15	26.99	26.31	4.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอลิโอฟิมแป็ง-พอลิแลคติก
แอซิด 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	6.81	6.28	6.39	5.53	6.82	6.37	0.53
32	10.05	11.82	9.99	10.00	11.42	10.65	0.89
42	14.39	15.93	15.27	14.19	13.99	14.75	0.81
52	16.27	17.91	17.93	17.20	16.91	17.25	0.71
67	19.58	19.90	19.51	20.35	19.47	19.40	0.36
75	21.05	21.66	21.74	21.88	22.60	21.79	0.55

ตารางที่ ก.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอลิโอฟิมแป็ง-พอลิคาโพร
แลกโตน 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	8.86	8.58	7.31	8.81	8.99	8.51	0.69
32	13.61	13.78	12.34	13.00	12.80	13.11	0.59
42	18.95	18.14	18.36	18.68	17.31	18.29	0.62
52	21.35	20.77	20.62	20.71	19.15	20.52	0.82
67	20.10	19.09	19.40	20.13	21.33	20.01	0.87
75	23.28	23.52	23.45	22.01	22.84	23.02	0.62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพร แลคโตน 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	7.61	6.98	6.59	7.06	7.15	7.08	0.37
32	11.19	10.41	10.12	11.97	10.20	10.77	0.79
42	15.68	15.74	15.26	15.15	15.60	15.49	0.26
52	16.81	17.40	16.32	15.59	16.91	16.60	0.68
67	20.10	19.09	19.40	20.12	21.33	20.01	0.87
75	23.28	23.51	23.45	22.01	22.84	23.02	0.62

ตารางที่ ก.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	9.20	8.21	9.07	8.88	9.01	8.84	0.39
2	9.54	9.44	9.10	9.74	9.18	9.40	0.26
3	11.00	11.14	10.77	10.63	11.33	10.97	0.27
4	12.29	12.47	11.63	13.18	12.20	12.35	0.55
5	18.60	17.85	17.80	17.85	17.18	17.86	0.50
7	21.62	20.26	21.91	21.98	20.05	21.17	0.93

ตารางที่ ก.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอลิโคมแปง-พอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ 10%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	7.56	6.62	7.31	7.82	6.60	7.18	0.54
2	8.36	8.53	8.47	8.12	8.12	8.32	0.19
3	8.80	8.97	9.34	9.67	9.25	9.20	0.33
4	9.67	10.55	10.12	10.13	11.32	10.36	0.60
5	13.93	14.98	13.93	13.51	13.03	13.88	0.72
7	18.10	17.46	17.91	16.46	17.58	17.50	0.63

ตารางที่ ก.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอลิโคมแปง-พอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ 30%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	5.99	5.04	5.12	5.81	5.22	5.44	0.43
2	7.14	7.30	7.45	7.25	7.43	7.31	0.13
3	7.85	7.43	7.18	7.76	7.57	7.56	0.26
4	8.78	8.06	8.60	8.35	8.13	8.38	0.30
5	10.52	11.04	11.46	10.80	9.88	10.74	0.59
7	15.21	14.75	15.67	15.01	14.75	15.08	0.38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแบ่ง-พอลิแลคติก
แอซิด 10%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	7.25	8.61	8.79	7.60	8.09	7.60	1.44
2	8.86	8.00	8.12	8.10	8.97	8.41	0.46
3	10.45	10.85	9.49	9.34	9.25	9.88	0.72
4	10.38	11.44	10.47	10.61	11.04	10.79	0.44
5	12.06	12.76	12.67	13.95	14.38	13.17	0.96
7	16.35	17.17	17.54	18.31	17.20	17.31	0.71

ตารางที่ ก.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแบ่ง-พอลิแลคติก
แอซิด 30%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	5.39	5.23	5.58	5.75	5.98	5.59	0.29
2	7.49	6.50	7.33	7.21	7.27	7.16	0.38
3	7.86	7.98	8.58	8.79	8.49	8.34	0.38
4	9.01	9.30	9.21	9.42	9.29	9.24	0.16
5	10.89	10.95	11.39	12.87	11.84	11.59	0.82
7	14.38	15.93	15.27	14.19	13.99	14.75	0.81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลค โทน 10%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	7.02	7.04	7.70	7.33	7.41	7.30	0.28
2	8.14	7.99	8.60	8.33	8.45	8.31	0.24
3	9.76	9.16	9.65	10.00	9.72	9.66	0.31
4	10.71	11.26	11.84	11.55	11.71	11.41	0.45
5	14.87	15.03	14.71	14.46	13.48	14.51	0.61
7	18.95	18.14	18.36	18.68	17.31	18.29	0.62

ตารางที่ ก.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อปริมาณความชื้นของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลค โทน 30%

เวลา (วัน)	ปริมาณความชื้น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	5.31	5.85	5.17	5.41	5.53	5.45	0.26
2	7.49	7.65	7.41	6.79	6.78	7.22	0.41
3	7.56	7.07	7.06	7.44	7.36	7.30	0.22
4	8.45	8.59	8.56	8.30	8.09	8.40	0.21
5	10.47	11.66	9.81	11.08	11.78	10.96	0.83
7	15.68	15.73	15.26	15.15	15.60	15.49	0.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ข.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	0.2386	0.2390	0.2254	0.2277	0.2109	0.2283	0.0115
32	0.2861	0.2795	0.2660	0.2725	0.2514	0.2711	0.0133
42	0.3220	0.3265	0.3135	0.3174	0.3311	0.3221	0.0070
52	0.2319	0.2665	0.3037	0.2536	0.3242	0.2760	0.0375
67	0.2012	0.2213	0.2145	0.2215	0.2203	0.2212	0.0170
75	0.2015	0.2103	0.2014	0.1997	0.2043	0.2034	0.0041

ตารางที่ ข.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	0.2970	0.2714	0.3156	0.2698	0.2674	0.2842	0.0212
32	0.3461	0.3618	0.3488	0.4039	0.3950	0.3711	0.0267
42	0.4432	0.4064	0.4254	0.4126	0.4325	0.4241	0.0148
52	0.3429	0.3488	0.3771	0.3424	0.3562	0.3535	0.0143
67	0.3462	0.3217	0.3989	0.2805	0.2914	0.3077	0.0262
75	0.2987	0.2706	0.2854	0.2845	0.2806	0.2839	0.0101

ตารางที่ ข.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอลิโตนีโม่เป็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	0.3756	0.3872	0.3954	0.3842	0.3756	0.3877	0.0152
32	0.4258	0.4369	0.4371	0.4362	0.4289	0.4352	0.0275
42	0.5313	0.4990	0.5243	0.5136	0.5302	0.5197	0.0185
52	0.4689	0.4596	0.4523	0.4512	0.4602	0.4578	0.0266
67	0.4125	0.4187	0.4105	0.4200	0.4185	0.4156	0.0091
75	0.3845	0.3759	0.3805	0.3841	0.3776	0.3805	0.0038

ตารางที่ ข.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอลิโตนีโม่เป็ง-พอลิแลคติกแอซิด 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	0.2575	0.2616	0.2502	0.2649	0.2503	0.2569	0.0066
32	0.3149	0.2816	0.3009	0.3037	0.2770	0.2956	0.0158
42	0.3340	0.3352	0.3351	0.3433	0.3401	0.3375	0.0235
52	0.2846	0.377	0.2974	0.3143	0.3292	0.3086	0.0176
67	0.2659	0.2932	0.2731	0.2849	0.2631	0.2761	0.0127
75	0.2426	0.2418	0.2411	0.2409	0.2421	0.2417	0.0007

ตารางที่ ข.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	0.3881	0.3673	0.3812	0.3902	0.3851	0.3824	0.0091
32	0.3985	0.4522	0.4019	0.4155	0.4153	0.4167	0.0212
42	0.4790	0.4742	0.4494	0.4521	0.4587	0.4607	0.0314
52	0.4066	0.3302	0.3373	0.3538	0.3421	0.3540	0.0301
67	0.3267	0.3066	0.3058	0.3017	0.2959	0.3073	0.0116
75	0.2698	0.2700	0.2678	0.2658	0.2699	0.2688	0.0018

ตารางที่ ข.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลก โทน 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	0.2458	0.2495	0.2754	0.2451	0.2558	0.2543	0.0125
32	0.3297	0.3039	0.3047	0.3017	0.3281	0.3136	0.0139
42	0.3984	0.3977	0.4155	0.3116	0.3871	0.3821	0.0407
52	0.2962	0.2510	0.2711	0.2654	0.2726	0.2713	0.0163
67	0.2311	0.2507	0.2335	0.2520	0.2103	0.2355	0.0170
75	0.2117	0.2085	0.2215	0.2103	0.2124	0.2129	0.0050

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลก โทน 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	0.3585	0.3182	0.3724	0.3841	0.3924	0.3651	0.0292
32	0.3969	0.3944	0.4334	0.4256	0.4053	0.4111	0.0174
42	0.4283	0.3874	0.4158	0.4241	0.3961	0.4104	0.0178
52	0.5087	0.5157	0.5152	0.5295	0.5313	0.5201	0.0098
67	0.3301	0.3239	0.3541	0.3058	0.3287	0.3285	0.0172
75	0.3012	0.3025	0.3102	0.3025	0.3100	0.3053	0.0044

ตารางที่ ข.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมจากแข็ง

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	0.5632	0.5840	0.6069	0.5411	0.5491	0.5689	0.0267
2	0.7525	0.7876	0.8185	0.7500	0.8235	0.7864	0.0349
3	0.6585	0.6487	0.6570	0.6493	0.6603	0.6547	0.0053
4	0.4612	0.4138	0.4390	0.4140	0.4508	0.4358	0.0214
5	0.3305	0.3694	0.3564	0.3519	0.3635	0.3544	0.0148
7	0.3220	0.3265	0.3135	0.3174	0.3311	0.3221	0.0070

ตารางที่ ข.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	0.9292	0.8605	0.8986	0.8741	0.9209	0.8967	0.0294
2	1.4659	1.3332	1.3702	1.2419	1.0981	1.3019	0.1393
3	0.8120	0.8359	0.7883	0.8047	0.8591	0.8200	0.0277
4	0.5104	0.6560	0.5375	0.5334	0.5692	0.5613	0.0569
5	0.4515	0.4487	0.4413	0.4782	0.4617	0.4568	0.0140
7	0.4432	0.4064	0.4254	0.4125	0.4325	0.4240	0.1486

ตารางที่ ข.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	1.1309	1.1303	1.0061	1.0576	1.1205	1.0891	0.0554
2	1.3818	1.6718	1.6482	1.5035	1.5461	1.5503	0.1171
3	1.0438	1.0964	1.0721	0.9632	0.9478	1.0247	0.0660
4	0.7062	0.8284	0.8843	0.6832	0.7854	0.7775	0.0837
5	0.5606	0.5580	0.5787	0.5453	0.5234	0.553	0.0204
7	0.5313	0.4990	0.5234	0.5136	0.5302	0.5197	0.0185

ตารางที่ ข.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	0.7979	0.7904	0.7968	0.7316	0.8124	0.7858	0.0313
2	1.0476	0.9544	0.9537	1.0244	0.9483	0.9857	0.0467
3	0.8665	0.9810	0.7969	0.8092	0.8092	0.8526	0.0767
4	0.5420	0.6225	0.4922	0.4797	0.5103	0.5237	0.0571
5	0.3832	0.3820	0.4364	0.3893	0.3951	0.3972	0.0040
7	0.3340	0.3352	0.3350	0.3433	0.3400	0.3375	0.0014

ตารางที่ ข.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	0.9269	0.9322	0.9723	0.9573	0.9022	0.9382	0.0273
2	1.2806	1.3407	1.3587	1.2138	1.3358	1.3059	0.0591
3	0.9339	0.9762	0.9678	1.0383	0.9558	0.9743	0.0391
4	0.7428	0.7718	0.7202	0.7439	0.7317	0.7421	0.0192
5	0.5477	0.5061	0.5057	0.4959	0.5458	0.5202	0.0359
7	0.5090	0.4842	0.4394	0.4521	0.4187	0.4607	0.0412

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลก โทน 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	0.7313	0.7323	0.6051	0.6166	0.5117	0.6394	0.0936
2	0.9218	0.9095	0.9330	0.8199	0.9426	0.9055	0.0494
3	0.7449	0.7427	0.7103	0.6648	0.7218	0.7169	0.0325
4	0.4696	0.4951	0.5139	0.4919	0.5123	0.5026	0.0276
5	0.4041	0.4136	0.4108	0.4028	0.3998	0.4062	0.0057
7	0.3984	0.3977	0.4155	0.3115	0.3871	0.3821	0.0407

ตารางที่ ข.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลก โทน 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	0.8575	0.8790	0.7267	0.7416	0.8674	0.8149	0.0742
2	1.2226	1.1918	1.4511	1.2120	1.4750	1.3105	0.1399
3	1.1382	1.0505	0.9908	0.9479	0.9910	1.0237	0.0737
4	0.5569	0.6041	0.6647	0.6012	0.6308	0.6115	0.0398
5	0.6005	0.5582	0.4171	0.5102	0.5812	0.5334	0.0732
7	0.4283	0.3874	0.4158	0.4241	0.3961	0.4104	0.0178

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.15 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตไฟโอมจากแป้งที่มีกลีเซอรอล

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	0.2436	0.2111	0.2019	0.2054	0.1873	0.2099	0.0207
10	0.2082	0.1926	0.1895	0.1835	0.1743	0.1896	0.0125
15	0.1947	0.1883	0.1859	0.1813	0.1858	0.1872	0.0049
20	0.0454	0.1441	0.1299	0.1423	0.1421	0.1208	0.0424
25	0.0988	0.1020	0.0965	0.0984	0.1027	0.0997	0.0026

ตารางที่ ข.16 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตไฟโอมจากแป้งที่มียูเรีย

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	0.2509	0.2249	0.2407	0.2024	0.1973	0.2233	0.0233
10	0.1857	0.1945	0.1959	0.2065	0.1894	0.1944	0.0079
15	0.1979	0.1778	0.1809	0.1712	0.1846	0.1825	0.0099
20	0.1710	0.1154	0.1042	0.0909	0.1092	0.1181	0.0309
25	0.1258	0.1334	0.1239	0.1301	0.1246	0.1276	0.0040

ตารางที่ ข.17 ค่าการรับแรงดึงของคอมพอสิตไฟโอมจากแป้งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	0.2305	0.2412	0.2652	0.2494	0.2571	0.2487	0.0135
10	0.2144	0.2153	0.2161	0.2179	0.2169	0.2161	0.0013
15	0.1853	0.1850	0.1930	0.1858	0.2051	0.1909	0.0086
20	0.1218	0.1372	0.1795	0.1188	0.1583	0.1431	0.0250
25	0.1489	0.318	0.1309	0.1342	0.1472	0.1386	0.0087



ค. ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโตโฟม

ตารางที่ ค.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโตโฟมจากแป้ง

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	3.69	4.02	4.28	4.01	3.63	3.93	0.2667
32	4.45	4.67	4.61	4.46	4.56	4.55	0.0951
42	6.08	6.21	6.38	6.21	6.29	6.23	0.1110
52	6.80	6.33	6.56	6.50	6.16	6.47	0.2416
67	6.67	6.47	6.32	6.62	6.50	6.51	0.1372
75	6.52	6.49	6.51	6.48	6.42	6.48	0.0391

ตารางที่ ค.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโตโฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	6.01	5.89	6.12	5.99	5.82	5.97	0.1154
32	6.44	6.24	6.13	6.52	6.08	6.28	0.1918
42	7.62	8.12	8.05	7.61	6.78	7.64	0.5336
52	7.93	7.86	7.50	7.58	7.78	7.73	0.1835
67	7.56	7.75	8.11	8.22	7.61	7.85	0.2984
75	7.88	7.91	7.85	7.86	7.81	7.86	0.0370

ตารางที่ ก.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลดกล่อน
11	4.38	4.26	4.22	4.18	4.32	4.72	0.0798
32	5.81	5.62	5.32	5.48	5.64	5.57	0.1840
42	6.87	6.90	6.91	7.04	7.12	6.96	0.1070
52	7.04	7.18	7.14	7.23	6.98	7.11	0.1023
67	7.19	7.26	7.09	7.39	6.82	7.15	0.2143
75	7.21	7.18	7.18	7.19	7.22	7.19	0.0181

ตารางที่ ก.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลดกล่อน
11	5.11	5.04	4.91	4.82	5.23	5.02	0.1617
32	6.21	6.43	6.29	6.46	6.45	6.36	0.1118
42	7.04	6.92	6.98	7.04	7.00	6.99	0.0498
52	7.44	7.25	7.39	7.14	7.42	7.32	0.1287
67	7.82	7.61	7.74	7.78	7.63	7.71	0.0923
75	7.82	7.64	7.78	7.69	7.82	7.75	0.0812

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลกติก แอซิด 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	3.86	3.78	4.12	4.09	4.23	4.01	0.1884
32	4.60	4.57	5.08	4.84	4.71	4.76	0.2079
42	6.45	6.25	6.21	6.31	5.95	6.24	0.1714
52	6.41	6.34	6.65	6.44	6.20	6.41	0.1039
67	6.61	6.54	6.56	6.63	6.70	6.61	0.0830
75	6.67	6.53	6.64	6.85	6.61	6.66	0.1183

ตารางที่ ก.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโตน 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	5.12	5.29	5.09	5.32	5.32	5.22	0.1134
32	6.48	6.31	6.41	6.21	7.09	6.50	0.3452
42	7.14	7.00	7.19	7.29	7.10	7.14	0.1073
52	8.12	7.61	8.01	7.69	7.71	7.82	0.2229
67	8.53	8.41	6.33	7.50	8.64	7.88	0.9782
75	7.88	8.36	8.46	7.71	7.52	7.98	0.4089

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
11	4.1	4.18	3.71	4.25	3.86	4.02	0.2672
32	4.96	7.72	5.11	4.81	4.87	4.89	0.1490
42	6.01	6.94	6.11	6.21	6.08	6.27	0.2488
52	6.90	6.81	6.69	6.83	6.87	6.82	0.0806
67	6.81	6.28	6.53	6.62	6.94	6.36	0.2554
75	6.91	6.57	6.32	6.54	6.29	6.52	0.2485

ตารางที่ ค.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	4.27	4.16	4.52	4.32	4.43	4.34	0.1398
2	5.25	5.24	4.96	6.01	5.56	5.40	0.3997
3	5.80	5.91	5.88	5.57	4.92	5.61	0.4111
4	5.98	5.73	6.38	6.12	6.08	6.05	0.2354
5	6.18	5.71	5.89	5.84	5.85	5.89	0.1735
7	6.08	6.21	6.38	6.21	6.29	6.23	0.1110

ตารางที่ ค.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิเมอร์โพรโปลีน-โพลีไวนิล แอลกอฮอล์ 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	5.93	5.17	5.27	5.13	5.79	5.45	0.3737
2	6.43	6.16	6.53	6.25	6.36	6.34	0.1457
3	7.14	7.02	6.83	7.16	7.16	7.16	0.1421
4	7.88	7.32	7.82	7.88	7.52	7.68	0.2523
5	7.66	7.56	7.84	7.44	7.35	7.57	0.1913
7	7.62	8.12	8.05	7.61	6.78	7.64	0.5336

ตารางที่ ค.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิเมอร์โพรโปลีน-โพลีไวนิล แอลกอฮอล์ 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	5.03	4.62	4.84	5.14	4.94	4.91	0.1981
2	5.91	5.81	5.98	6.01	6.15	5.97	0.1257
3	6.87	7.00	6.75	7.20	7.06	6.97	0.1732
4	7.22	7.13	7.54	7.33	7.42	7.32	0.1614
5	7.62	7.71	7.30	6.99	7.28	7.38	0.2893
7	6.87	6.90	6.91	7.04	7.12	6.96	0.1070

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแป็ง-พอลิ
แลคติก แอซิด 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	5.57	4.84	5.48	5.29	5.18	5.27	0.2861
2	6.96	6.71	6.98	6.67	6.24	6.71	0.2991
3	7.41	6.93	6.76	7.11	7.15	7.07	0.2415
4	7.44	7.53	7.65	7.42	7.32	7.47	0.1243
5	7.04	7.11	7.15	7.00	7.14	7.08	0.0653
7	7.04	6.92	6.98	7.04	7.00	6.99	0.0498

ตารางที่ ค.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแป็ง-พอลิ
แลคติก แอซิด 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	4.63	4.374	4.62	4.15	4.52	4.45	0.2014
2	6.14	5.69	5.87	5.36	5.94	5.80	0.2940
3	6.63	6.11	6.23	6.11	6.24	6.26	0.2139
4	6.60	6.64	6.58	6.47	6.45	6.54	0.0834
5	6.58	6.27	6.31	6.57	6.38	6.42	0.1451
7	5.98	6.45	6.25	6.21	6.31	6.24	0.1714

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	5.05	5.14	5.33	5.27	5.18	5.19	0.1090
2	6.61	5.95	6.26	6.26	6.01	6.21	0.2609
3	6.96	6.83	7.38	6.68	6.65	6.90	0.2957
4	6.64	7.16	6.33	6.85	6.98	6.79	0.3204
5	7.26	7.15	7.01	6.84	7.26	7.10	0.1798
7	7.14	7.00	7.19	7.29	7.10	7.14	0.1073

ตารางที่ ก.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	4.79	5.08	4.88	4.57	4.58	4.78	0.2145
2	5.56	5.79	5.66	5.60	5.58	5.63	0.0928
3	6.22	6.18	5.91	6.28	5.91	6.10	0.1770
4	6.28	6.62	6.53	6.21	5.97	6.32	0.2599
5	6.24	6.47	6.43	6.62	6.47	6.44	0.1361
7	6.01	6.94	6.11	6.21	6.08	6.27	0.3813

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.15 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโอฟิมจากแป้งที่มีกลีเซอรอล

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	6.98	6.61	6.87	6.93	6.81	6.84	0.1435
10	7.91	7.36	7.56	7.48	7.84	7.63	0.2360
15	7.52	7.75	7.81	7.56	7.89	7.71	0.1600
20	7.71	8.05	7.96	7.68	7.66	7.81	0.1799
25	8.03	8.12	7.99	8.21	7.94	8.05	0.1075

ตารางที่ ก.16 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโอฟิมจากแป้งที่มียูเรีย

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	6.88	6.71	6.04	6.91	6.57	6.62	0.3530
10	7.41	7.44	7.46	7.65	7.21	7.43	0.1566
15	7.56	7.64	7.41	7.66	7.55	7.56	0.0980
20	7.63	7.54	7.68	7.84	7.51	7.64	0.1309
25	7.38	7.65	7.89	7.68	7.91	7.70	0.2153

ตารางที่ ก.17 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอลิโอฟิมจากแป้งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	6.64	6.69	6.97	6.91	6.89	6.82	0.1456
10	7.01	7.11	7.28	7.09	7.15	7.12	0.0990
15	7.21	7.18	7.29	7.02	7.41	7.22	0.1437
20	7.51	7.44	7.61	7.36	7.31	7.44	0.1192
25	7.45	7.42	7.68	7.68	7.94	7.63	0.2106

จ. ค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ง.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลดกดอื่น
11	0.4497	0.3830	0.4577	0.3183	0.3269	0.3871	0.0657
32	0.5262	0.3786	0.5235	0.4905	0.5411	0.4920	0.0660
42	0.5930	0.6845	0.5795	0.5889	0.7388	0.6369	0.0710
52	0.5551	0.4409	0.5383	0.5749	0.6030	0.5424	0.0616
67	0.4899	0.4355	0.4758	0.5024	0.4956	0.4799	0.0266
75	0.4629	0.4679	0.4513	0.4454	0.4583	0.4572	0.0089

ตารางที่ ง.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลดกดอื่น
11	0.9203	0.8497	0.8711	0.9276	0.9917	0.9121	0.0552
32	1.0552	1.1393	1.0227	1.0452	1.0960	1.0717	0.0461
42	1.3387	1.0795	1.0728	1.1571	1.5146	1.2326	0.1906
52	1.1600	1.0852	1.1941	1.2886	1.0886	1.1633	0.0841
67	0.9422	0.9693	1.1489	1.0650	1.0795	1.0410	0.0845
75	0.9565	1.0634	1.0309	1.0227	1.0015	1.0150	0.0395

ตารางที่ 3.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	1.1080	1.2042	1.0176	1.0257	1.1432	1.0998	0.0791
32	1.3317	1.3785	1.3916	1.3992	1.4221	1.3846	0.0335
42	1.5725	1.5477	1.6766	1.3714	1.4808	1.5298	0.1131
52	1.4030	1.3953	1.3030	1.3035	1.3916	1.3613	0.0486
67	1.1736	1.2407	1.1413	1.1945	1.2548	1.2010	0.0469
75	1.0544	1.1829	0.9766	1.0222	1.0463	1.0565	0.0769

ตารางที่ 3.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติกแอซิด 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	0.8821	0.8709	0.8176	0.8158	0.8327	0.8438	0.0308
32	1.0663	1.0594	1.0423	1.0745	1.0317	1.0548	0.0175
42	1.3371	1.3191	1.3308	1.2608	1.4772	1.3450	0.0798
52	1.0961	1.1463	1.0100	1.0415	0.9953	1.0579	0.0627
67	1.1207	1.0612	0.9985	1.0243	1.0572	1.0524	0.0461
75	1.0660	1.0257	0.9962	1.0758	0.9609	1.0249	0.6479

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	1.0957	1.1156	1.1657	1.2018	1.2560	1.1670	0.0649
32	1.3785	1.2881	1.2764	1.2901	1.2745	1.3015	0.0435
42	1.6789	1.2365	1.6003	1.3820	1.8532	1.5504	0.2437
52	1.3760	1.3841	1.4283	1.2860	1.3212	1.3591	0.0558
67	1.3265	1.3476	1.1674	1.2860	1.2937	1.2842	0.0698
75	1.2562	1.0996	1.1097	1.1940	1.1894	1.1698	0.0651

ตารางที่ ง.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	0.7440	0.6868	0.8004	0.8510	0.7173	0.7599	0.0658
32	1.2809	1.2689	0.9422	0.8516	0.9671	1.0621	0.1989
42	1.1074	1.1832	1.1275	1.1923	1.2226	1.1666	0.0477
52	0.9101	1.1476	1.1393	0.9043	1.1208	1.0444	0.1256
67	0.9673	1.0540	0.9960	0.8843	0.9301	0.9663	0.0644
75	0.7749	0.9323	1.0135	0.8618	1.1020	0.9369	0.1275

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพร แลคโตน 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	1.0949	1.2663	1.2310	1.0813	1.2132	1.1773	0.0838
32	1.4777	1.4479	1.5101	1.3387	1.3982	1.4345	0.0675
42	1.6826	1.5255	1.7511	1.5558	1.7766	1.6583	0.1133
52	1.3629	1.3366	1.2290	1.3965	1.2186	1.3087	0.0804
67	1.4373	1.4521	1.3319	1.4636	1.3271	1.4024	0.0672
75	1.2273	1.2858	1.3647	1.3459	1.2849	1.3017	0.0547

ตารางที่ ๓.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	2.4426	2.5699	2.3090	2.3376	2.2871	2.3892	0.1172
2	2.7772	2.9675	2.8427	2.8740	2.9501	2.8823	0.0783
3	1.4933	1.5382	1.4772	1.5502	1.4440	1.5006	0.0438
4	1.1268	1.1654	1.1347	1.1432	1.1728	1.1486	0.0198
5	0.9090	0.9175	0.9327	0.9962	0.8718	0.9255	0.0454
7	0.5930	0.6845	0.5795	0.5889	0.7388	0.6369	0.0710

ตารางที่ ง.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	2.7539	2.7559	2.6296	2.8076	2.8420	2.7578	0.0806
2	2.6370	3.1391	2.8632	3.4561	3.7370	3.1665	0.4422
3	2.3137	2.4581	1.9468	1.9452	2.6029	2.2614	0.3059
4	1.5760	1.9224	2.0499	1.6373	1.8443	1.8060	0.1973
5	1.1676	1.3040	1.4038	1.6098	1.7192	1.4409	0.2240
7	1.3387	1.0795	1.0728	1.1571	1.5146	1.2326	0.1906

ตารางที่ ง.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	4.3571	4.4819	3.2029	3.5605	2.9094	3.7023	0.6954
2	5.3763	6.0382	6.4886	5.9775	3.9285	5.5618	0.9950
3	2.5507	4.2645	4.2603	2.9127	3.5041	3.4985	0.7759
4	2.7570	2.9011	2.9827	2.7618	2.5639	2.7933	0.1600
5	1.4427	0.0200	1.7088	2.0482	1.3706	1.7180	0.3149
7	1.5725	1.5477	1.6766	1.3714	1.4808	1.5298	0.1131

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	2.0250	2.4305	2.3228	2.3447	2.2668	0.1531	0.1023
2	4.0074	4.1300	4.0339	4.2770	4.0929	4.1082	0.1059
3	2.3402	2.2920	2.4390	2.3857	2.5910	2.4096	0.1150
4	1.5537	1.5907	1.5778	1.7278	1.5854	1.6071	0.0689
5	1.6083	1.6561	1.4894	1.4411	1.5255	1.5441	0.0874
7	1.3371	1.3191	1.3308	1.2608	1.4772	1.3452	0.0798

ตารางที่ ง.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	2.8571	2.7269	2.8069	2.8350	2.8231	2.8098	0.0498
2	5.1607	5.1751	5.1942	5.1652	5.1832	5.1756	0.0135
3	2.7841	2.8069	2.8231	3.1994	3.0124	2.9252	0.1782
4	1.8867	1.8148	1.9703	2.1805	2.0634	1.9832	0.1442
5	1.6570	1.7770	1.8602	1.6509	1.7122	1.7314	0.0880
7	1.6789	1.2365	1.6003	1.3820	1.8532	1.5520	0.2437

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโตน 10%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	2.2061	2.2229	2.3265	1.7689	1.7841	2.0617	0.2644
2	3.2855	3.2342	3.3750	3.2696	3.3685	3.3066	0.0623
3	2.8614	3.1994	3.1573	2.8795	3.1712	3.0538	0.1681
4	1.7049	1.8885	1.9925	1.6666	1.7924	1.8090	0.1335
5	1.6300	1.6127	1.5150	1.4814	1.7630	1.6004	0.1105
7	1.1074	1.1832	1.1275	1.1923	1.2226	1.1666	0.0477

ตารางที่ ง.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโตน 30%

เวลา (วัน)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	4.1533	4.2519	4.4813	4.4725	4.2144	4.3147	0.1522
2	5.7900	5.5681	5.6916	5.6802	5.7586	5.6977	0.0856
3	3.5041	3.8844	3.7937	3.7092	3.9765	3.7736	0.1807
4	2.1969	1.9324	1.9253	2.0046	1.7975	1.9713	0.1464
5	1.7841	1.7857	1.7471	1.9312	1.7855	1.8067	0.0715
7	1.6826	1.5255	1.7511	1.5558	1.7766	1.6583	0.1133

ตารางที่ ง.15 ค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้งที่มีกลีเซอรอล

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	1.1829	0.7954	0.8186	0.7532	0.8330	0.8766	0.1738
10	0.5365	0.6322	0.5927	0.5160	0.5247	0.5604	0.0500
15	0.2632	0.2906	0.2452	0.2947	0.1883	0.2564	0.0431
20	0.1993	0.2456	0.1387	0.1960	0.1587	0.1876	0.0412
25	0.1109	0.0865	0.1027	0.0900	0.1105	0.1001	0.0113

ตารางที่ ง.16 ค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้งที่มียูเรีย

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	0.9556	0.9014	0.8422	0.9478	0.8150	0.8924	0.0625
10	0.5628	0.6337	0.5639	0.6126	0.5559	0.5856	0.0348
15	0.3658	0.3441	0.3653	0.3693	0.3658	0.3620	0.0101
20	0.2989	0.2739	0.2866	0.2961	0.2608	0.2833	0.0159
25	0.1920	0.1777	0.2120	0.2173	0.2445	0.2087	0.0255

ตารางที่ ง.17 ค่าการรับแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการรับแรงโค้งงอ (MPa)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
5	0.9311	0.9301	0.8719	0.8560	0.8719	0.8922	0.0356
10	0.5542	0.5626	0.5733	0.5578	0.5733	0.5642	0.0088
15	0.3938	0.3930	0.3804	0.4028	0.4023	0.3945	0.0091
20	0.2498	0.2325	0.2438	0.2342	0.2498	0.2420	0.0083
25	0.1943	0.2120	0.1838	0.2141	0.2031	0.2015	0.0126

จ. ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ จ.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแป้ง

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	44.06	13.80	45.91	46.62	45.94	45.27	1.2855
32	49.85	48.92	48.72	49.28	49.71	49.30	0.4868
42	50.78	49.52	52.35	52.71	51.79	51.43	1.2909
52	51.28	50.60	52.82	51.56	51.27	51.51	0.8162
67	51.41	51.22	52.20	51.61	51.13	51.51	0.4260
75	50.30	51.83	52.02	51.32	52.28	51.55	0.7801

ตารางที่ จ.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแป้ง-พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
11	48.47	51.11	50.31	49.86	48.80	49.71	1.0832
32	51.23	50.98	52.73	52.32	49.92	51.44	1.1182
42	56.69	55.55	59.43	56.72	55.90	56.86	1.5223
52	56.34	56.95	55.60	56.01	56.80	56.34	0.5575
67	56.75	56.08	52.98	55.67	55.73	55.44	1.4409
75	52.70	55.06	57.22	57.42	56.04	55.69	1.9241

ตารางที่ จ.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมเป็ง-
พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	52.59	50.25	57.77	55.68	52.91	53.84	2.9216
32	57.85	56.20	55.95	54.64	54.05	55.74	1.4816
42	60.52	61.14	57.46	60.53	58.52	59.63	1.5682
52	57.41	63.49	65.55	57.06	60.12	60.72	3.7309
67	58.47	59.28	62.19	60.01	57.51	59.49	1.7726
75	58.71	57.26	60.87	61.37	59.80	59.60	1.6621

ตารางที่ จ.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมเป็ง-
พอลิแลคติก แอซิด 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	43.95	42.25	54.06	50.18	47.18	47.52	4.7546
32	52.60	52.61	52.48	53.57	53.76	53.00	0.6121
42	57.41	56.77	57.57	59.82	56.18	57.55	1.3839
52	54.78	55.15	56.23	56.24	57.39	55.96	1.0304
67	57.46	57.51	58.11	58.75	58.23	58.01	0.5401
75	59.27	57.78	58.40	57.03	59.27	58.35	0.9666

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิแลคติก แอซิด 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	51.02	50.46	50.72	51.03	50.35	50.72	0.3139
32	54.64	56.40	56.46	55.85	56.98	56.07	0.8934
42	59.50	62.22	62.59	63.46	60.04	61.56	1.7046
52	58.37	57.16	57.86	57.04	58.58	57.80	0.6933
67	59.68	58.84	61.32	60.24	59.83	59.98	0.9043
75	59.74	61.33	61.00	58.87	59.87	60.16	1.0011

ตารางที่ จ.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 10%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	47.91	49.21	49.50	46.16	48.84	48.34	1.3610
32	51.69	51.07	54.64	54.85	55.79	53.61	2.0907
42	57.98	55.97	58.57	59.17	59.24	58.19	1.3413
52	57.44	57.76	57.62	57.41	57.70	57.59	0.1546
67	58.75	57.41	57.31	57.44	57.89	57.76	0.5977
75	57.04	57.28	57.39	57.27	56.54	57.10	0.3382

ตารางที่ จ.7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิคาโพรแลกโตน 30%

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
11	53.28	52.98	51.09	51.85	52.78	52.40	0.9041
32	56.61	55.93	55.72	56.79	56.03	56.22	0.4607
42	59.56	60.90	58.90	62.74	58.26	60.07	1.7832
52	59.20	59.95	60.32	60.55	59.75	59.95	0.5247
67	60.51	60.70	61.76	60.93	61.46	61.07	0.5230
75	61.66	59.83	59.96	61.21	60.63	60.66	0.7847

ตารางที่ จ.8 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมจากแข็ง

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	39.07	37.87	42.65	42.20	42.41	40.84	2.2099
2	53.51	49.34	48.16	48.81	48.20	49.60	2.2355
3	48.01	49.07	51.07	53.05	54.89	51.22	2.8172
4	53.28	50.42	54.44	52.96	50.61	52.34	1.7587
5	51.48	51.05	51.99	47.13	54.21	51.17	2.5669
7	50.78	49.52	52.35	52.71	51.79	51.43	1.2909

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.9 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอกอฮอล์ 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	45.89	41.14	49.39	48.26	41.39	45.21	3.8225
2	56.61	53.87	54.76	53.66	52.36	54.25	1.5727
3	54.00	53.60	56.55	58.16	58.83	56.23	2.3714
4	57.61	55.50	55.69	57.96	57.56	56.86	1.1714
5	59.38	55.56	56.29	55.11	56.52	56.57	1.6695
7	56.69	55.55	59.43	56.72	55.90	56.86	1.5223

ตารางที่ จ.10 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็ง-พอลิไวนิล แอกอฮอล์ 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
1	56.97	54.86	56.97	49.67	53.28	54.35	3.0429
2	56.09	57.89	55.55	57.71	55.38	56.52	1.1965
3	62.59	55.16	59.18	58.16	57.61	58.54	2.7070
4	57.59	60.89	60.90	56.63	60.68	59.34	2.0608
5	60.46	57.86	56.91	62.49	60.52	59.65	2.2451
7	60.52	61.14	57.46	60.53	58.59	59.63	1.5682

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.11 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตไฟเบอร์เป็ง-พอลิแลคติก แอซิด 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	50.49	45.46	46.79	46.80	48.69	47.65	1.9614
2	51.88	51.76	52.32	52.62	52.20	52.16	0.3469
3	53.70	54.93	52.55	54.94	54.79	54.19	1.0503
4	56.25	57.57	55.01	56.84	56.11	56.36	0.9452
5	56.18	57.31	57.41	58.31	56.83	57.21	0.7836
7	57.41	56.77	57.57	59.82	56.18	57.55	1.3839

ตารางที่ จ.12 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตไฟเบอร์เป็ง-พอลิแลคติก แอซิด 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	53.61	55.43	54.62	55.69	55.22	54.92	0.8307
2	56.37	56.31	55.52	56.42	57.47	56.42	0.6943
3	58.31	57.78	57.96	56.08	58.82	57.79	1.0373
4	58.01	60.21	60.55	61.45	59.20	59.88	1.3221
5	60.27	59.04	60.45	60.83	62.69	60.66	1.3179
7	59.50	62.22	62.59	63.46	60.04	61.56	1.7046

ตารางที่ จ.13 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงไค้งงของคอมพอลิโตนีโม่เป็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 10%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงไค้งง (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
1	48.44	47.88	49.73	49.70	51.17	49.38	1.2811
2	53.04	53.22	51.82	53.16	52.60	52.77	0.5858
3	53.83	53.79	54.28	54.95	52.83	53.94	0.7738
4	53.17	53.78	52.06	54.29	52.51	53.16	0.9074
5	54.01	54.29	56.42	56.62	54.84	55.24	1.2106
7	57.98	55.97	58.57	59.17	59.24	58.19	1.3413

ตารางที่ จ.14 ผลของเวลาในการเก็บต่อค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงไค้งงของคอมพอลิโตนีโม่เป็ง-พอลิคาโพรแลคโตน 30%

เวลา (วัน)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงไค้งง (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความกลาดเคลื่อน
1	52.03	53.68	53.00	52.87	52.02	52.72	0.7063
2	53.86	53.04	55.97	54.80	54.22	54.38	1.0953
3	55.95	54.99	57.18	55.34	54.55	55.60	1.0215
4	58.33	59.41	58.77	58.64	59.30	58.90	0.4508
5	58.17	59.76	57.92	57.29	59.29	58.49	1.0159
7	59.56	60.90	58.90	62.74	58.26	60.07	1.7832

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ จ.15 ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็งที่มีกลีเซอรอล

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
5	52.90	52.63	53.04	53.44	53.78	53.16	0.4545
10	56.56	54.67	53.89	56.48	54.80	55.28	1.1858
15	56.62	58.02	59.10	56.93	60.32	58.20	1.5355
20	59.03	59.58	66.35	62.72	65.08	62.63	3.1546
25	65.91	64.95	64.20	63.97	66.14	65.03	0.9804

ตารางที่ จ.16 ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็งที่มียูเรีย

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
5	53.33	52.48	53.17	53.16	54.84	53.39	0.8733
10	55.53	55.02	55.51	54.85	54.10	55.00	0.5878
15	56.58	56.91	58.39	56.10	56.01	56.80	0.9639
20	62.24	62.62	63.17	63.69	62.49	63.24	0.9584
25	64.19	65.05	66.07	66.20	66.35	65.57	0.9276

ตารางที่ จ.17 ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอของคอมพอสิตโฟมแข็งที่มีแอมโมเนียม คลอไรด์

ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (%)	ค่าการยึดตัวเนื่องจากแรงโค้งงอ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
5	53.13	51.89	52.94	53.05	54.19	53.04	0.8174
10	53.64	54.07	54.47	55.02	54.29	54.30	0.5088
15	59.85	58.69	58.91	57.05	57.34	58.37	1.1583
20	63.71	66.42	65.41	63.45	65.70	64.94	1.2074
25	69.11	67.48	66.21	67.13	67.48	67.48	1.0479

ฉ. ค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ฉ.1 ค่าการดูดซับน้ำของคอมพอสิตโฟม

ชนิดของโฟม (%)	ค่าการดูดซับน้ำ (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
Starch foams	129.64	127.84	122.09	124.46	130.49	126.91	3.5503
Starch-10% PVA foams	89.59	87.35	86.69	87.35	86.69	87.53	1.1973
Starch-30% PVA foams	73.99	73.07	70.32	77.30	77.47	74.43	3.0199
Starch-10% PLA foams	98.16	93.52	97.68	95.18	94.48	95.80	1.6374
Starch-30% PLA foams	78.21	80.08	75.56	75.36	77.49	77.34	2.7502
Starch-10% PCL foams	93.24	91.72	95.30	91.36	92.10	92.74	2.0267
Starch-30% PCL foams	78.28	73.78	73.37	78.52	78.92	76.57	1.9581

ช. ค่าการสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ช.1 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากเอนไซม์ของคอมพอสิตโฟม

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากเอนไซม์ (%)			
	Starch foam	Starch-30% PVA	Starch-30% PLA	Starch-30% PCL
5	5.02	5.04	6.80	6.99
10	5.19	11.20	8.30	13.73
15	9.28	12.95	11.67	19.90
20	11.52	13.59	17.13	20.28
30	20.32	14.85	19.07	27.22
40	26.14	19.63	26.49	35.05
50	48.06	45.36	36.69	41.33
60	65.78	50.67	47.93	65.25
120	76.47	79.19	72.74	86.23
180	99.79	91.58	91.03	90.23

ข. ค่าความหนาแน่นของคอมพอสิตโฟม

ตารางที่ ข.1 ค่าความหนาแน่นของคอมพอสิตโฟม

ชนิดของโฟม	ค่าความหนาแน่น (%)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ความถดถอย
Starch foams	0.1378	0.1448	0.1378	0.1357	0.1337	0.1380	0.0041
Starch-10% PVA foams	0.1723	0.1860	0.1888	0.1799	0.1990	0.1854	0.0099
Starch-30% PVA foams	0.2197	0.2480	0.2177	0.2058	0.2336	0.2249	0.0162
Starch-10% PLA foams	0.1637	0.1558	0.1530	0.1687	0.1668	0.1616	0.0038
Starch-30% PLA foams	0.2136	0.2158	0.2197	0.2262	0.2096	0.2170	0.0063
Starch-10% PCL foams	0.1853	0.1863	0.1836	0.1834	0.1765	0.1830	0.0068
Starch-30% PCL foams	0.1761	0.1662	0.1601	0.1673	0.1709	0.1681	0.0161

6. A process for preparing a composite composition comprising the steps of: (a) preparing a mixture of a carboxylated polymer, a starch and a solvent; (b) drying the mixture to form a dried starch/carboxylated polymer blend with a moisture content below 20%; and (c) physically treating the blend so that an aqueous solution to achieve a composite that demonstrates inhibition; provided that throughout the process the starch does not completely gelatinize.
7. The process according to claim 6 wherein in step (a) the starch is added to a solution of the carboxylated polymer in the solvent.
8. The process of claim 6 wherein in step (a) the carboxylated polymer is added to the starch which is mixed in the solvent.
9. The process of claim 6 wherein in step (a) the carboxylated polymer and starch are first blended together to form a blend, and then the solvent is sprayed on the blend.
10. The process of claim 6 wherein the carboxylated polymer is selected from the group consisting of xanthan, low methoxyl pectin, carboxymethylcellulose and polyacrylic acid.
11. The process of claim 10 wherein the carboxylated polymer is carboxymethylcellulose.
12. The process according to claim 6 wherein in step (c) the physical treatment is heat or irradiation.
13. The process of claim 6 wherein when the physical treatment of step (c) involves temperatures of greater than about 120 degree. C., the moisture content of the dried blend of step (b) is less than about 1% by weight of the blend.
14. The process of claim 6 further comprising treating the dried blend of step (b) with acid.
15. The process of claim 6 wherein the weight ratio of carboxylated polymer to polysaccharide used in step (a) is less than about 1:20.
16. The process of claim 15 wherein the weight ratio of carboxylated polymer to polysaccharide is about 1:200 to about 1:50.
17. A composite composition prepared according to the process of claim 6
18. A composite composition prepared according to the process of claim 9.
19. A composite composition prepared according to the process of claim 15.
20. The composite composition of claim 1 wherein the starch is chemically crosslinked and the Brabender viscosity profile demonstrates a double plateau.
21. The composite composition of claim 20 wherein the starch is a waxy starch.

Description

[0001] This application claims priority from provisional application No. 60/309,063 filed Jul. 31, 2001.

FIELD OF THE INVENTION

[0002] This invention relates to an inhibited non-solubilized granular starch modified by less than 5% of a carboxylated polymer. In addition, a process is provided wherein a non-solubilized, substantially granular starch is mixed with a carboxylated polymer, dried to form a starch/carboxylated polymer blend and then physically treated to form a starch/carboxylated polymer composite. Further, this invention relates to the improved industrial and food products prepared from these starch/carboxylated polymer composites.

BACKGROUND

[0003] Native and modified starches have been used for many years in the food industry to provide processed foods with improved product appearance and increased consumer appeal. Starches can impart desirable properties to food products, ranging from shape retention and sliceability to desirably grainy and pulpy textures in sauces and dressings. Sources of starch include roots, root-like or tuber plants and cereals.

[0004] When native starch granules are dispersed in excess water and heated they become hydrated and swell. The swelling of the granules results in an increase in viscosity which, in unmodified starch, peaks at temperatures in the range of 56.degree. to 95.degree. C. This increase in viscosity is a desired property in many food and industrial applications. Swollen, hydrated starch granules, however, are quite fragile. When a granular starch slurry is maintained at temperatures greater than 80.degree. C., the starch granules begin to fragment and the viscosity breaks down. Shear or conditions of extreme pH also tend to disrupt and fragment the granules, so that the starch polymers dissociate and become solubilized, leading to a rapid breakdown of the initially high viscosity.

[0005] Both the swelling of the starch granules and the breakdown in viscosity can be inhibited by treating the starch with chemical reagents that introduce covalent intermolecular bridges or crosslinks between the starch molecules. The crosslinks reinforce the associative hydrogen bonds holding the granules together, restricting the swelling of the starch granules, which inhibits the disruption and fragmentation of the granules. This allows the starch to delay solubilization during cooking and results in a desirably "shorter" texture instead of a "slimy" and cohesive texture.

[0006] A reduction in the disruption and fragmentation of the granules can also be achieved according to the method described in U.S. Pat. No. 5,718,770 wherein the thermal treatment of starch granules results in properties characteristic of the crosslinked starches. Accordingly, chemically crosslinked or thermally inhibited starches are used in many applications where a stable viscosity starch paste is needed.

[0007] Other means of reducing the rapid breakdown in starch solution viscosity have been explored. For example, U.S. Pat. Nos. 5,424,088 and 4,298,729 describe a composition of a carboxylated polymer, which may be xanthan, and starch which is characterized by reduced dissolution in water and increased acid, heat and shear stability. Both processes require that the starch be at least partially gelatinized (solubilized). Because of the resultant increase in viscosity caused by the partial gelatinization, the process is limited to relatively low solids contents and drying becomes an undesirably energy-intensive process. Further, since gelatinization disrupts the starch granule, solutions of the xanthan/starch compositions are unable to maintain a satisfactorily high viscosity or provide delayed gelatinization during cookout.

[0008] Carboxylated polymer and starch compositions have been investigated for use in a variety of applications. For example, WO 00/32064 describes a controlled-release, digestible carbohydrate material (possibly starch) which is coated, encapsulated, entrapped or embedded in a crosslinked polysaccharide matrix. U.S. Pat. No. 5,895,804 describes a thermosetting system which may comprise a polysaccharide (including starch) and a carboxylated polymer. However, both of these systems require high amounts, greater than 5% by weight, of the expensive carboxylated polymer.

[0009] There is an ongoing need to provide starch compositions which are able to address the problem of breakdown in starch viscosity and do not require high levels of expensive components, toxic chemicals and an energy-intensive processes.

[0010] The present invention provides a process for obtaining a novel, granular starch modified by less than 5% by weight of carboxylated polymer which possesses these properties to a degree exhibited only by chemically crosslinked or thermally inhibited starches. The invention further relates to the improved foods prepared from these composites.

SUMMARY OF THE INVENTION

[0011] This invention relates to an inhibited non-solubilized granular starch modified by less than 5% of a carboxylated polymer. In addition, a process is provided wherein a non-solubilized, substantially granular starch is mixed with a carboxylated polymer, dried to form a starch/carboxylated polymer blend and then physically treated to form a starch/carboxylated polymer composite. Further, this invention relates to the improved industrial and food products prepared from these starch/carboxylated polymer composites.

[0012] The novel process of the present invention comprises mixing the starch, carboxylated polymer and a solvent; drying the mixture to form a blend; and physically treating the dried blend with heat or irradiation to give the composite. Drying and subsequent physical treatment may be optionally conducted in one step.

[0013] The composites prepared according to this method are inhibited and are characterized by properties equivalent to those obtained via chemical crosslinking such as stability to heat, shear and pH changes. The process may be manipulated to produce composites with variety of desirable solution properties including, for example, non-cohesive, short textures, higher viscosities, delayed gelatinization and/or improved solution stability.

[0014] This invention also relates to the improved foods and industrial products prepared from the composites which exhibit improved freeze/thaw stability, viscosity and texture, as well as reduced syneresis in certain applications.

DETAILED DESCRIPTION

[0015] This invention relates to an inhibited non-solubilized granular starch modified by less than 5% of a carboxylated polymer. In addition, a process is provided wherein a non-solubilized, substantially granular starch is mixed with a carboxylated polymer, dried to form a starch/carboxylated polymer blend and then physically treated to form a starch/carboxylated polymer composite. Further, this invention relates to the improved industrial and food products prepared from these starch/carboxylated polymer composites.

[0016] All starches and flours (hereinafter "starch") which substantially retain their granular form and are substantially non-solubilized may be suitable for use herein and may be derived from any native source. A native starch or flour as used herein, is one as it is found in nature. Also suitable are starches and flours derived from a plant obtained by standard breeding techniques including crossbreeding, translocation, inversion, transformation or any other method of gene or chromosome engineering to include variations thereof. In addition, starch or flours derived from a plant grown from artificial mutations and variations of the above generic composition which may be produced by known standard methods of mutation breeding are also suitable herein.

[0017] Typical sources for the starches and flours are cereals, tubers, roots, legumes and fruits. The native source can be corn, pea, potato, sweet potato, banana, barley, wheat, rice, sago, amaranth, tapioca, arrowroot, canna sorghum, and waxy or high amylose varieties thereof. Particularly useful starches are waxy starches, including waxy maize, waxy tapioca, waxy pea, waxy wheat, waxy rice, waxy potato, waxy sorghum, and waxy barley. As used herein, the term "waxy" is intended to include a starch or flour containing at least about 95% by weight amylopectin and the term "high amylose" is intended to include a starch or flour containing at least about 40% by weight amylose.

[0018] Conversion products derived from any of the starches, provided such conversion does not completely destroy the granular nature of the starch, including fluidity or thin-boiling starches prepared by oxidation, enzyme conversion (e.g., with alpha-amylase, beta-amylase, pullulanase, isoamylase, or glucoamylase), acid hydrolysis, heat and or acid dextrinization, and or sheared products may also be useful herein.

[0019] Chemically modified starches may also be used, provided such modification does not completely destroy the granular nature of the starch. Such chemical modifications are intended to include, without limitation, crosslinked starches, acetylated and organically esterified starches,

hydroxyethylated and hydroxypropylated starches, phosphorylated and inorganically esterified starches, cationic, anionic, nonionic, and zwitterionic starches, and succinate and substituted succinate derivatives of starch. Such modifications are known in the art, for example in *Modified Starches: Properties and Uses*, Ed. Wurzburg, CRC Press, Inc., Florida (1986).

[0020] Physically modified starches may also be used, provided the modification does not completely destroy the granular nature of the starch. As used herein, a starch that has been completely solubilized indicates a starch in which the granular nature has been completely destroyed. A starch which has an incompletely destroyed granular nature is a starch which retains some granular character such as starches in which the granules swell but are not completely solubilized. Thus the useful starches of the present invention include all starches which have a substantially granular nature, whether the granules are swelled or not, as long as they are not completely solubilized.

[0021] The composite compositions of the present invention also comprise a carboxylated polymer. The term polymer is intended to include oligomers, and biopolymers, wherein the biopolymers are naturally occurring polymers. The polymers may be modified or unmodified. Such modifications may include but are not limited to cross-linking, neutralization, hydrolysis, enzyme treatment and partial esterification. The polymers have a weight average molecular weight of at least 1,000 and preferably 10,000 or more. The actual molecular weight of the polymer is not a limiting factor.

[0022] The synthetic carboxylated polymers which may be used in the present invention include, without limitation, poly(acrylic acid) and carboxylic-acid-functionalized polyesters and polymers prepared from monomers such as vinyl acetate ("VA"), (Meth)acrylic acid, maleic anhydride ("MANh"), maleic acid, itaconic acid ("IA"), crotonic acid ("CA"), and beta-carboxyl ethyl acrylate ("BCEA"). As used herein (Meth)acrylic denotes both acrylic and (methyl)acrylic acid and esters thereof.

[0023] Other carboxylated polymers useful in the present invention include, without limit, alginate, xanthan, carboxymethylcellulose, low methoxyl and high methoxyl pectin, pectic acid, hyaluronic acid, polyaspartic acid and polyglutamic acid, oxidized starch, oxidized guar, and carboxymethylated starch. These examples are not limiting and the starches of the present invention may be used in combination with virtually any polycarboxylated polymer. Preferred carboxylated polymers are xanthan, low methoxyl pectin, carboxymethylcellulose and polyacrylic acid.

[0024] The present invention describes an inhibited starch and carboxylated polymer composite composition and the process for making these composites. This process effectively results in encapsulating or "coating" the outer surface of the starch granule with the carboxylated polymer, which, after drying forms a blend. The blend is then physically treated to form the composite so that upon solubilization, the swelling of the starch is inhibited.

[0025] The process is achieved by mixing the carboxylated polymer in a solvent, followed by addition of the starch. Alternatively, the carboxylated polymer may be added, neat or as a solution, to the starch in a solvent. Further, the starch and carboxylated polymer may be mixed in the absence of the solvent, and then the solvent is added to the mixture of the starch and carboxylated polymer. For example, the solvent may be sprayed on the dry blend. In each case, the starch is in a granular, substantially non-gelatinized form. The solvent is preferably water.

[0026] An acceptable range of carboxylated polymer to starch expressed in weight percent ratios is about 1:500 to about 1:20; particularly from about 1:200 to about 1:20; and especially particularly from about 1:200 to 1:50. The ratio of carboxyl:hydroxyl groups in the carboxylated polymer versus starch is also greater than 1:80.

[0027] After adding the granular starch, carboxylated polymer and solvent in any order, the mixture is agitated. Agitation may be accomplished by all forms of mechanical mixing, such as a Hobart mixer, enclosed mixing vessel or extruder. Any suitable aqueous or organic solvent may be used to facilitate the agitation. The preferred solvent is water in a concentration of about 45-75% wt %/wt %. The starch/carboxylated polymer mixture may be optionally dewatered using conventional methods such as filtration and centrifugation.

[0028] The starch/carboxylated polymer mixture is then dried to a moisture content of less than 20%. Drying methods may include, without limitation, spray-drying, freeze-drying, air-drying, flash-drying and vacuum-drying, particularly air-drying, with the proviso that the drying method does not completely destroy the granular nature of the starch. The dried starch/carboxylated polymer mixture may optionally be ground.

[0029] After drying, the starch/carboxylated polymer blend is physically treated to form an inhibited composite. Before physical treatment, acid may be optionally used to vary the degree of physical inhibition exhibited by the treated composite. The physical treatment may include heat or radiation treatment (e.g. infrared and Cobalt(60)), particularly heat treatment. Heat treatment may be carried out at temperatures of from about 60.degree. C. to about 200.degree. C., or from about 80.degree. C. to about 120.degree. C., provided that if temperatures greater than 120.degree. C. are used, the starch/carboxylated polymer blend has been dried to a moisture content of less than about 1% moisture. The heat treatment must be carried out in such a way to ensure that the starch is not completely gelatinized. Particularly suitable methods of heat treatment include extrusion, oven and fluidized bed treatment.

[0030] The time required to complete inhibition of the composite is dependent upon the means of heating and by the composition and moisture content of the starch/carboxylated polymer mixture. For example, a 1:100 wt/wt % carboxymethyl cellulose ("CMC"): waxy corn starch mixture may be heated in an oven from about 1 second to about 24 hours, as long as the starch does not completely lose its granular nature. Generally, in the temperature range of from about 80.degree. C. to about 120.degree. C., treatment times of less than four hours are sufficient to give a composite with a desirable degree of inhibition. All other variables being equal, longer treatment times result in composites with greater inhibition. Likewise, treatment to form the composites at higher temperatures results in more rapid achievement of inhibition compared to treatment at lower temperatures.

[0031] Additionally, methods in which heat transfer is more efficient, such as the fluidized bed method, require less time to complete desired degrees of inhibition. Further, less heat treatment is generally required for mixtures containing higher levels of carboxylated polymer.

[0032] The mixing and/or drying and/or physical treatment steps may be carried out in a process reactor that is capable of performing all unit operations or by using appropriate pieces of equipment for the individual process steps.

[0033] The starch/carboxylated polymer composites prepared by the aforementioned process are formed by "coating" the outer surface of the starch granule, leaving the granule substantially intact, though the granule may swell. Solutions of these composites exhibit inhibition and have desirable properties similar to those of chemically cross-linked starches. These properties include stability to heat, shear and pH changes. Additional properties include a non-cohesive short texture with no lumping, higher viscosity and delayed gelatinization during cook-out with improved solution stability. Further, the process provides a substantially white composite, particularly suitable for food applications.

[0034] Additionally, composites prepared by first mixing the starch and polycarboxylated polymer and then adding the solvent, for instance by spraying the solvent on the starch/polycarboxylated polymer mixture, then drying the mixture to produce a blend and physically treating the blend, provide substantially improved delayed gelatinization during cook-out. For example, when heated at 95.degree. C., a solution of the composite prepared according to this method exhibits a delay in the gelatinization of the starch of at least 2 minutes, in some cases up to 10 minutes. In contrast, at 95.degree. C., the starch of the corresponding untreated blend immediately begins to swell and results in almost immediate gelatinization of the starch.

[0035] The composites of this invention may be used to improve a variety of products including food and beverages, paper and paper board, pharmaceuticals (including controlled release applications), adhesives and personal care products. Food and beverages is intended to include, but is not limited to,

sauces and gravies, salad dressings and mayonnaises, cultured products such as yogurts and sour cream, puddings, desserts, baked goods, instant foods, soups, candies including gelled candies, batters, breadings, and coatings and beverages, particularly baked goods, gelled candies, batter, breadings and coatings, particularly as opacifiers for cream soups and non-dairy foods and in fruit/pie fillings as well as bulking agents in dietary foods. In adhesive applications, the composites of the present invention are useful as fillers or film-forming agents. Personal care products comprising the composites of the present invention are intended to include, but are not limited to creams and lotions, mousses and gels, hair care products, and deodorants.

EXAMPLES

[0036] The following examples are presented to further illustrate and explain the present invention and should not be taken as limiting in any regard. All percents/parts used are on a weight/weight basis, and temperature is in Centigrade unless otherwise noted.

[0037] The following starches were used throughout the examples: waxy corn starch (AMIOCA.RTM., commercially available from National Starch and Chemical Company) and chemically cross-linked starch (FIRMTEX.RTM. commercially available from National Starch and Chemical Company). The following carboxylated polymers were used throughout the examples: xanthan (Keltrol.RTM. from Kelco), carboxymethylcellulose ("CMC", commercially available from Hercules, Incorporated) and low methoxyl pectin (commercially available from Hercules, Incorporated).

[0038] Procedure A: Measurement of Inhibition

[0039] The inhibition of the composites is indicated by comparing the Brabender viscosities of the composite with their corresponding untreated blends. Viscosity profile are obtained with a C. W. Brabender viscoamylograph (obtainable from C. W. Brabender Instruments, Inc.). The physically treated composite sample (27.0 g) and water (473.0 g) are slurried together without pH adjustment and added to the cooking chamber of the viscoamylograph. The slurry is ramped to 50.degree. C., followed by controlled heating at 1.5.degree. C./min from 50-95.degree. C. The solution is then held at 95.degree. C. for 20 minutes, followed by cooling at 1.5.degree. C./min from 95-50.degree. C. Throughout this temperature profile, the viscosity of the solution is measured. From the peak viscosity (highest viscosity observed on the viscosity curve recorded on the chart recorder of the viscoamylograph) and the final viscosity (viscosity at 95 .degree. C.+10 minutes), the % breakdown is calculated based on the following equation:

% Breakdown viscosity=[(Peak viscosity-Viscosity at 95.degree. C. after 10 minutes)/Peak Viscosity].times.100.

[0040] Those composites that display a lower percentage breakdown compared to the corresponding untreated blends of the carboxylated polymer and granular starch, are deemed inhibited. In addition, where the composites do not exhibit a peak viscosity or the final viscosity is higher than the peak viscosity, the composite is also deemed inhibited.

Example 1

Preparation of a Starch/Carboxylated Polymer Composite

[0041] A 1:100 xanthan:waxy corn *starch composite* was prepared by air drying, followed by heat treatment in a pre-heated oven according to the following procedure.

[0042] Xanthan (25 g) was added to 2.5 liters of de-ionized water and the mixture stirred using a mechanical paddle (Baldor Electric Co., Electric Lab Stirrer with a strade blade impeller) for more than 1 hour, until the solution is fully hydrated. Starch powder (1666 g) was added to the 1% xanthan solution and the slurry stirred for 1 hour in a Ross Mixer. Additional starch (834 g) was added and stirred for a further 1 hour in the Ross Mixer. The mixture was then air-dried until the resultant powder had less than 20% moisture content (moisture level measured using a CSC Scientific Digital Moisture Balance). The powder was ground and filtered through a 60 mesh size screen.

[0043] The ground material was heated at a temperature of 120.degree. C. for varying times of

between 2 to 8 hours in a pre-heated oven and their level of inhibitions measured according to Procedure A, described above.

[0044] As is demonstrated by Graph 1, as the treatment time was increased while the temperature was maintained at 120.degree. C., the composites become more inhibited as shown by a decrease in percentage breakdown viscosity.

Example 2

Effect of Carboxylated Polymer:Starch Ratio.

[0045] Xanthan:waxy corn starch (1:20, 1:100 and 1:200) composites were prepared according to the procedure detailed in Example 1, varying only the relative amount of xanthan and starch used for each sample. The level of

[0046] inhibition for each sample was then measured according to Procedure A.

[0047] As is shown by Graph 2, samples containing higher levels of xanthan showed progressively greater degrees of inhibition.

Example 3

Effect of Types of Carboxylated Polymer upon the Composite

[0048] Three samples of 1:100 carboxylated polymer:starch composites were prepared as described in Example 1. In one sample, the polycarboxylated polymer was xanthan, in the second,

[0049] carboxymethylcellulose and in the third, a 50:50 combination of xanthan and carboxymethylcellulose. Each composite was heat treated for 4 hours at 120.degree. C.

[0050] Composites made with different polycarboxylated polymers had different viscosity profiles. For example, as Graph 3 demonstrates, unlike the composites containing xanthan, the carboxymethylcellulose composite possessed a delayed viscosity increase.

Example 4

Effect of Temperature upon the Heat-Treatment of the Composite Preparation

[0051] A 1:100 CMC/waxy corn *starch composite* was prepared as described in Example 1. This composite was heat treated in a fluidized bed reactor ("FBR"). The composite was added to the FBR at room temperature. The FBR was then ramped up to 120.degree. C. and for a second sample to 150.degree. C. respectively. Samples were obtained once the FBR had reached 120.degree. C. (t=0) and at 150.degree. C. (t=180), respectively. For the sample heated to 150.degree. C., an additional sample was removed after 180 minutes at 150.degree. C. (t=180).

[0052] The Brabender viscosities were measured for these heat-treated composites, but in this case, the Brabender profile was performed at pH3 and at 5% composite solids. The heat-treated composite sample (23.0g), 50 ml of an aqueous solution of citric acid monohydrate (prepared by diluting 387 g of citric acid monohydrate to 1000 ml in a volumetric flask) and water (407 g) were slurried and added to the cooking chamber of the viscoamylograph. The aqueous buffer solution of citric acid monohydrate was prepared by mixing 1.5 volumes of solution A with 1.0 volumes of solution B, where solution A is prepared by dissolving 210.2 grams of citric acid monohydrate with sufficient purified water in a volumetric flask to make 1 liter and solution B is prepared by dissolving 98.0 grams of tri-sodium citrate dihydrate with sufficient purified water in a volumetric flask to make 1 liter. The slurry was ramped to 60.degree. C., followed by controlled heating at 1.5.degree. C./min from 60-92.degree. C. The solution was then held at 92.degree. C. for 15 minutes.

[0053] As Graph 4 illustrates, samples prepared at a temperature above 120.degree. C. showed a significant increase in inhibition, even at relatively short treatment times.

Example 5

Comparison of Properties of Composites and Blends

[0054] A 1:100 xanthan:waxy corn *starch composite* was prepared according to the following procedure. Waxy corn starch (750 g) was slurried at 30% concentration. Xanthan (7.5 g) was dispersed at 0.5% concentration. The starch slurry and xanthan solution were combined using a mechanical paddle (Baldor Electric Co., Electric Lab Stirrer with a straight blade impeller) for 1 hour. This slurry, which was at room temperature, was spray dried. Spray drying conditions were: Inlet temperature 220.degree. C., outlet temperature 95-100.degree. C., atomizing air pressure 30 psi. Spray drying lasted for 1.5 hours. The sample collected was passed through a 60 mesh size screen. The material was heat treated in a pre-heated oven at 120.degree. C. for 4 hours and its level of inhibition measured according to Procedure A.

[0055] This composite was compared to a material prepared from a starch that was solubilized prior to drying as described in U.S. Pat. No. 4,298,729. Briefly, jet cooked (138.degree.) waxy corn starch (460 g) was combined with xanthan (4.6g) as a 0.5% solution using a straight blade mixer and spray-dried under the following conditions: Inlet temperature 220.degree. C., outlet temperature 95-100.degree. C., atomizing air pressure 30 psi. Spray drying lasted for 1.5 hours. The sample collected was passed through a 60 mesh size screen and heat-treated in a pre-heated oven at 120.degree. C. for 4 hours. The sample's inhibition was measured according to Procedure A.

[0056] As demonstrated by the results recorded in Graph 5, the composite material was desirably more viscous than the solubilized starch materials prepared as described by U.S. Pat. No. 4,298,729.

Example 6

Effect of Type of *Starch on the Composite* Properties

[0057] A 1:100 xanthan: potato *starch composite* was prepared according to the procedure of Example 1. The level of inhibition was measured according to Procedure A and compared to a sample of potato starch alone.

[0058] As demonstrated by the values in Graph 6, formation of the carboxylated polymer/*starch composite* provided significant inhibition for potato starches as well as corn starches described in the previous examples.

Example 7

Effect of the Preparation Method on the Viscosity Profile of the Final Composite

[0059] A dry-blend (384 g, 12% moisture) of carboxymethylcellulose (CMC) and a waxy corn starch (CMC:Starch=1:100) was loaded in a "HobartMixer" (type N-50; Hobart Corporation, Troy, Ohio, US). While mixing the blend (equipment setting 1) 342 g water were sprayed onto the dry blend within 5 min. Subsequently, the moistened blend (50.3% moisture) was mixed for 0.5 hours. The resulting mixture was air-dried until the moisture content of the powder was less than 20%. The dried powder was then heat-treated for 4 hours at 120.degree. C. in a pre-heated oven. Graph 7 compares the viscosity profile of the composite product prepared according to this method and a 1:100 CMC-waxy corn *starch composite* that was impregnated as described in Example 1 and heat treated in a fluidized bed for 30 min at 120.degree. C.

[0060] The data presented in Graph 7 demonstrates that differing viscosity profiles can be obtained by varying the impregnation and heat treatment method. Therefore, it is possible to meet specific application needs by changes in the preparation method.

Example 8

Effect of Starch Modifications on the Composite Properties

[0061] Composite of 1:100 carboxymethylcellulose:starch were prepared as described in Example 1. The starch used was a native waxy corn starch and a chemically cross-linked. Both composites were heat treated at 120.degree. C. for 4 hours and their degree of inhibition measured according to Procedure A.

[0062] As the graph below illustrates, the composite containing the

[0063] chemically cross-linked starch showed a unique double plateau in its Brabender viscosity as compared to the native waxy corn starch.

United States Patent
Billmers, et al.

6,627,752
September 30, 2003

Lactide modified starch derivatives and the process of preparation thereof

Abstract

Starch lactide derivatives and the preparation of such derivatives wherein starch is reacted with lactide in an aqueous caustic media. Another embodiment involves the extrusion of the starch lactide derivatives to form starch based foam products having increased flexibility, strength and compatibility.

Inventors: Billmers; Robert L. (Stockton, NJ); Roesser; David S. (Clinton, NJ)

Assignee: National Starch and Chemical Investment Holding Company (New Castle, DE)

Appl. No.: 632296

Filed: August 3, 2000

Current U.S. Class: 536/110; 536/124

Intern'l Class: C08B 031/02; C08B 031/04; C07H 001/00

Field of Search: 536/110,124

References Cited [Referenced By]

U.S. Patent Documents

<u>4443595</u>	Apr., 1984	Namikoshi et al.	536/58.
<u>5043196</u>	Aug., 1991	Lacourse et al.	428/35.
<u>5247013</u>	Sep., 1993	Shinoda et al.	525/54.
<u>5540929</u>	Jul., 1996	Narayan et al.	424/422.
<u>5693786</u>	Dec., 1997	Tanaka et al.	536/107.
<u>5756556</u>	May., 1998	Tsai et al.	521/84.

Foreign Patent Documents

WO 95/25750	Sep., 1995	WO
-------------	------------	----

Other References

Chemical Abstracts 119:183207r, Ester Grafted Starches for Biodegradable Thermoplastics, vol. 119, 1993, p. 146.

R.L. Whistler et al., "Starch: Chemistry and Technology", 2.sup.nd Ed., Ch. X, 1984, p. 311-388.

Primary Examiner: Wilson; James O.

Assistant Examiner: White; Everett

Attorney, Agent or Firm: LeCroy; David

Claims

What is claimed is:

1. A starch lactide diester derivative having the formula: ##STR4##
where St is starch, R is alkyl of 1 to 3 carbon atoms, X is H, alkali metal, alkaline earth metal or ammonium and from about 1 to 10% by weight of the diester group, based on the weight of dry starch, is bound to the starch.
2. The starch derivative of claim 1 wherein the R is methyl.

3. The starch derivative of claim 1 wherein the starch is high amylose having at least 40% by weight of amylose content.
4. The starch derivative of claim 1 wherein the starch is high amylose corn starch.
5. The starch derivative of claim 1 wherein the starch is further modified with about 1 to about 15% by weight of bound alkylene oxide having 2 to 6 carbon atoms.
6. The starch derivative of claim 5 wherein the alkylene oxide is propylene oxide.
7. The starch derivative of claim 1 wherein the R is methyl.
8. The starch derivative of claim 1 wherein from about 1.5 to 5% by weight of the diester group is bound to the starch.
9. The starch derivative of claim 8 wherein the starch is high amylose starch having at least 40% by weight of amylose content.
10. The starch derivative of claim 9 wherein the R group is methyl.
11. The starch derivative of claim 10 wherein the starch is high amylose corn starch.
12. The starch derivative of claim 10 wherein the starch is further modified with about 1 to 15%, by weight, of bound alkylene oxide having 2 to 6 carbon atoms.
13. The starch derivative of claim 12 wherein the starch is high amylose corn starch and the alkylene oxide is propylene oxide.
14. The starch derivative of claim 13 wherein the starch has at least 65% by weight of amylose content.
15. The method of preparing a starch-based foam product comprising extruding starch having the composition of claim 1 in the presence of a total moisture content of up to about 25% and at a temperature of from about 100 to 250 degree C.
16. The method of claim 15 wherein the starch has at least 40% by weight of amylose content.
17. The method of claim 16 wherein the starch is further modified with from about 1 to about 15% by weight of bound alkylene oxide having 2 to 6 carbon atoms.
18. The method of claim 17 wherein the starch is high amylose corn starch having at least 65% by weight of amylose content and the alkylene oxide is propylene oxide.
19. The method of claim 15 wherein from about 1.5 to about 5% by weight of the diester group is bound to the starch.
20. A method of preparing a starch lactide derivative wherein starch is reacted with lactide in an aqueous caustic system.
21. The method of claim 20 wherein the lactide has the formula: ##STR5## where R is alkyl of 1 to 3 carbon atoms.
22. The method of claim 20 wherein the system has a pH of about 7 to about 10.
23. The method of claim 20 wherein the starch is high amylose starch having at least 40% by weight of amylose content.
24. The method of claim 20 wherein the starch is high amylose corn starch.
25. The method of claim 20 wherein the starch is further modified with from about 1 to about 15% by weight of bound alkylene oxide having 2 to 6 carbon atoms.
26. The method of claim 25 wherein the starch has an amylose content of at least 65% by weight and the alkylene oxide is propylene oxide.

Description

BACKGROUND OF THE INVENTION

This invention relates to starch lactide diester derivatives and the preparation of such derivatives involving the reaction of starch with lactide in an aqueous caustic media. These derivatives are particularly useful in the formation of starch based foam products having increased flexibility and strength, and compatibility with synthetic polymers.

Various starch derivatives and modifications have been disclosed over the years and recently there have been many attempts to develop modified starches with biodegradable and other physical and chemical properties.

A review of starch derivatives and particularly starch esters can be found in "Starch: Chemistry and Technology", second edition, edited by R. L. Whistler et al., Chapter X, 1984. Additional disclosure

of starch ester derivatives can be found in "Modified Starches: Properties and Uses", edited by O. B. Wurzburg, 1986, pp. 55-77.

U.S. Pat. No. 5,540,929 issued Jul. 30, 1996 to R. Narayan et al. Discloses biodegradable compositions comprising polysaccharides grafted with a cyclic aliphatic ester monomer in the presence of an organometallic polymerization agent. PCT patent application WO 95/25750 published Sep. 25, 1995 discloses starch derivatives grafted with aliphatic polyesters which are prepared in a procedure wherein a cyclic ester such as a lactone is polymerized with starch in a bulk polymerization using a transition metal catalyst. Japanese Patent 05125101 dated May 21, 1993, is disclosed in Chemical Abstracts 119:183207r and shows starches grafted with lactones or lactides using a non-aqueous solvent system.

Despite the various disclosures of starch derivatives and the preparation thereof as noted above, there still is the need for a starch derivative that is useful in the formation of foam products having increased flexibility and strength, and increased compatibility with synthetic polymers such as polycaprolactone, polylactic acid and polyesters.

SUMMARY OF THE INVENTION

This invention relates to starch lactide derivatives and the method of preparation where starch is reacted with lactide in an aqueous caustic medium. More particularly, this invention is directed to starch lactide diester derivatives having the following formula: ##STR1##

where St is the starch base material, X is H, alkali metal, alkaline earth metal or ammonium, R is alkyl of 1 to 3 carbon atoms, and from about 1 to 10% by weight of the diester group is bound to the starch, based on the dry weight of starch.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

This invention involves starch lactide diester derivatives which are useful in preparing *starch foam* products having increased flexibility and strength. The starch lactide derivatives have the formula (1), described above, and are prepared by modifying or reacting starch with lactide in an aqueous caustic system.

The base starch material used as the starting starch material in preparing the modified starch lactide may be any of several starches, native or modified. Such starches include those derived from any plant source including corn, potato, wheat, rice, tapioca, sago, sorghum, waxy maize and high amylose starch, i.e. starch having at least 40% and more particularly at least 65% by weight of amylose content, such as high amylose corn, etc. Starch flours may also be used as a starch source. Also included are the conversion products derived from any of the former bases including, for example, dextrin prepared by hydrolytic action of acid and/or heat; oxidized starches prepared by treatment with oxidants such as sodium hypochlorite; fluidity to thin boiling starches prepared by enzyme conversion or mild acid hydrolysis; and derivatized and crosslinked starches.

The starting starch material used in this invention, as described above, can be unmodified or modified and the term starch as used herein includes both types. By modified it is meant that the starch can be derivatized or modified by typical processes known in the art, e.g., esterification, etherification, oxidation, acid hydrolysis, crosslinking and enzyme conversion. Typically, modified starches include esters, such as the acetate and the half-esters of dicarboxylic acids, particularly the alkenylsuccinic acids; ethers, such as the hydroxyethyl and hydroxypropyl starches; and cationic starches such as starch modified with 2-diethylaminoethyl chloride (DEC) and starch modified with quaternary ammonium reagents such as 3-chloro-2-4-hydroxypropyltrimethylammonium chloride; starches oxidized with hypochlorite; starches reacted with crosslinking agents such as phosphorus oxychloride, epichlorohydrin, and phosphate derivatives prepared by reaction with sodium or potassium orthophosphate to tripolyphosphate and combinations thereof. Derivatized starches include cationic,

anionic, amphoteric, non-ionic and crosslinked starches. These and other conventional modifications of starch are described in "Starch: Chemistry and Technology", second edition, edited by R. L. Whistler, et al., Chapter X, 1984. Due to the nature of the starch ester, other modifications should preferably be accomplished before treatment with the lactide to avoid hydrolysis of the starch ester.

The starches of this invention can be granular or dispersed, i.e., cooked, extruded, spray-dried, etc. In the case of modification of dispersed starches, the final product must be recovered by means other than filtration. This includes, but is not limited to spray-drying, freeze-drying, precipitation from solvent, etc.

In one preferred embodiment, the starch material is a high amylose starch, i.e., one containing at least 40%, by weight to amylose and more preferably at least 65%, by weight, of amylose.

One modification of the starch starting material that is especially useful in this invention is the etherification with alkylene oxides, particularly those containing 2 to 6, preferably 2 to 4 carbon atoms. Ethylene oxide, propylene oxide and butylene oxide are exemplary compounds that are useful in etherifying the starting starch material, with propylene oxide being especially preferred. Varying amounts of such compounds may be used depending on the desired properties and economics. Generally, up to 15% or more, more particularly 1 to 15% and preferably, up to about 10%, more particularly 1 to 10% by weight, of bound alkylene group, based on the weight of starch, will be used.

The starch lactides of this invention (1) are prepared by reacting starch with lactide or lactide derivative, i.e. a cyclic ester having a six membered ring with the formula: ##STR2##

where R is alkyl of 1 to 3 carbons and preferably 1 carbon atom. The lactide or cyclic diester is formed from its corresponding α -hydroxy acid by esterification.

The starch starting material is modified or reacted with lactide by adding starch and lactide in a caustic aqueous medium at room temperature using either an aqueous slurry or aqueous dispersion of the starch material. The reaction is carried out under alkaline conditions at a pH of about 7 to 10 and preferably about 7 to 8. The pH is conveniently controlled by the periodic addition of a dilute aqueous solution of an alkali material.

Any alkali material may be used as the alkali reagent or alkali medium in the method of this invention. Particularly useful alkali materials are the alkali metal hydroxides and alkaline earth metal hydroxides or the Group IA or IIA hydroxides, oxides, carbonates or other salts. Illustrative alkali materials are sodium hydroxide, potassium hydroxide, calcium hydroxide, ammonium hydroxide, magnesium hydroxide, sodium carbonate and trisodium phosphate. Preferred alkali are the alkali metal hydroxides and most preferred is sodium hydroxide and potassium hydroxide.

The reaction is carried out at room temperature (typically about 22.5.degree. C.) although a range of temperatures can be used, more particularly about 5 to 45.degree. C. and preferably about 20 to 30.degree. C.

The amount of lactide to be used in modifying the starch material will vary to some degree depending on the properties desired and the nature of the starch. While the amount of lactide can vary from about 1 to 50% or more, based on the weight of starch, more particularly from about 1 to 30% and preferably from about 5 to 20% by weight of lactide will be used based on the weight of starch. The amount of derivative group bound to the starch, i. e. ##STR3##

will be from about 1 to 10% and preferably from about 1.5 to 5% by weight, based on the weight of dry starch.

The lactide modified starches of this invention are particularly useful in preparing starch-based foams. Such foam products have improved flexibility and strength and can be prepared using an extrusion process in accordance with known procedures. Typical extrusion processes for forming starch foamed products are disclosed in U.S. Pat. Nos. 5,043,196 issued Aug. 27, 1991 to Lacourse et al. and U.S. Pat. No. 5,756,556 issued May 26, 1998 to Tsai et al. In such patents, which are incorporated herein by reference, 30 extrusion of starch is carried out at a temperature of from about 100 to 250.degree. C. under a total moisture content of up to about 25%, more particularly from about 8 to 25% and preferably about 10 to 21% by weight, based on the weight of starch. Addition of a nucleating agent or salt to the starch feed also is useful to improve processing and properties of the expanded product. The lactide modified starches of this invention may also be useful in the preparation of other biodegradable articles and products of different sizes, shapes and forms and may be made by a number of operations such as foaming, filming compression molding, injection molding, blow molding, extrusion, co-extrusion, vacuum forming, thermoforming, and combinations thereof.

The modified starches of this invention will provide better compatibility and enhanced physical properties when blended with synthetic polymers such as polyvinyl alcohol, polycaprolactone, polylactic acid, and polyesters.

Depending on the application, the modified starch can range in amount from about 1 to 99% and preferably about 10 to 50%, by weight, of the blend.

The following examples further illustrate the embodiments of this invention. In the examples, all parts and percentages are given by weight and all temperatures are in degrees Celsius unless otherwise noted.

EXAMPLE 1

Modification of Starch with Lactide (3,6-Dimethyl-1,4-dioxane-2,5-dione)

A total of 1000 g of Hylon VI I starch (high amylose corn starch with about 70% amylose content, available from National Starch and Chemical Company, was slurried into 1500 mL of cold (200C) water in a 4 L stainless steel beaker and mixed with an overhead stirrer until uniform. The reaction vessel was equipped with a pH control unit set to deliver 3% NaOH solution to a set pH point of 7.5. Powdered l-lactide was added at a rate of 5 g/15 minutes until a total of 100 g of lactide were added. The reaction was stirred an additional hour while maintaining the pH. The pH of the slurry was then adjusted to 5.0-6.0 with dilute HCl and the slurry was filtered and washed with water to remove residual reagents. The sample was then spread onto trays and air dried to about 10% moisture.

Analysis of the starch derivative was accomplished by slurrying 5.000 g of sample with known moisture into 250 mL of distilled water. The slurry was heated in a boiling water bath for 10 minutes and cooled to room temperature by placing in a cold water bath. The sample was then titrated to a phenolphthalein end point using 0.1 N NaOH. Fifty (50) mL of 0.1 N NaOH was added and stirred for 48 hours in a sealed beaker. The sample was titrated until colorless with 0.1 N HCl and the quantity of HCl recorded. The amount of bound lactide was determined using the following formula:

$$\% \text{ bound lactide} = 144.13 [5.0 - (\text{mL HCl} \times 0.1)] / \text{anhydrous sample weight}$$

The results for different starch samples are given below in Table 1.

TABLE 1

Sample	Starch Type	Treatment Level (%)	Bound Diester %)
1	Hylon VII	5	1.79
2	Hylon VII	10	2.26
3	Corn	10	2.54

The examples shown above illustrate the modification of starch with lactide under aqueous condition to provide modified starches with diester lactide pendent chains.

EXAMPLE 2

Extrusion of Diester Lactide Containing Starches

The modified starch prepared in Example 1 was dry blended with microcalc (nucleating agent) for a total of 2% ash. The moisture content of the starch was measured and additional water was added to the extruder at the inlet to obtain a total of 17-19% water in the material exiting the die. The starch was fed into a Werner-Pfleiderer ZSK-30 twin screw extruder configured with 7 barrels and moderate shear design. The sample was heated to 180°C (thermal and mechanical energy) by the time it got to the die. Foaming occurred as the molten starch exited through 5 mm openings at the end of the die body. The product was allowed to equilibrate to 50% relative humidity and then evaluated for compressibility and resilience and compared to other samples made with unmodified starches. The foamed products made with different modified samples is shown below in Table 2.

TABLE 2

Starch Type	Modification (% bound)	Foam Properties
Hylon VII	none	brittle
Hylon VII	Propylene Oxide (5%)	fair
Corn	Propylene Oxide (4%)	brittle
Hylon VII	Lactide (2.5%)	fair
Hylon VII	Lactide (2.3%)/Propylene Oxide (5%)	good
Corn	Lactide (2.5%)	fair

The samples illustrated in this example demonstrate improved properties when the starches are modified with lactide. Addition of other modifications such as propylene oxide show even further improvements.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



