

ผลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



นายวัชรินทร์ แซ่หลาย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

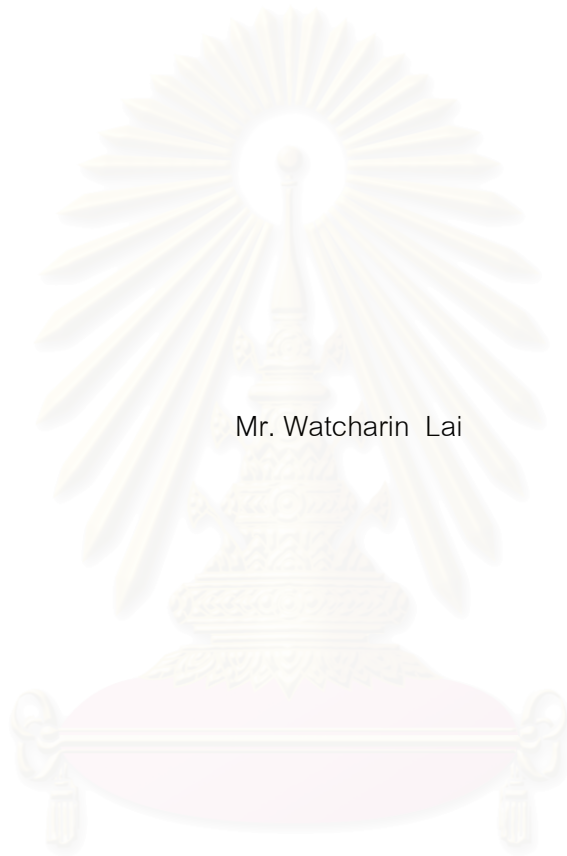
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0388-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CELLULOSE FIBERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF  
LOW DENSITY POLYETHYLENE FOAM



Mr. Watcharin Lai

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0388-9

|                      |   |
|----------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์    | ผลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิด<br>ความหนาแน่นต่ำ |
| โดย                  | นาย วัชรินทร์ แซ่หลาย   |
| สาขาวิชา             | วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ                            |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | อาจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล  |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพวรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ รัชนา ศิริสุข)

นายวัชรินทร์ แซ่หลาย : ผลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. (EFFECT OF CELLULOSE FIBERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW DENSITY POLYETHYLENE FOAM)  
อ. ที่ปรึกษา : รศ. อรุษา สรวารี, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล xxx หน้า.  
ISBN 974-03-0388-9

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเส้นใยเซลลูโลสและผงเส้นใยเซลลูโลสจากฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเตรียมโฟมด้วยกระบวนการอัดร้อน ที่ปริมาณเส้นใยเซลลูโลส 1-3%โดยน้ำหนัก และปริมาณผงเส้นใยเซลลูโลส 3%โดยน้ำหนัก แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

จากการวิจัยพบว่าโฟมทุกตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน และจากการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีจำนวนเซลล์แบบเปิดเพิ่มขึ้นและขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสเท่ากัน พบว่าโฟมที่ผสมผงเส้นใยมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าโฟมที่ผสมเส้นใย โดยผงเส้นใยกระจายตัวในเนื้อโฟมได้ดีกว่าเส้นใย ในขณะที่เดียวกันโฟมที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าโฟมที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าว โดยเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวมีการกระจายตัวในเนื้อโฟมได้ดีกว่าเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบ นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสทั้งสองชนิดจัดตัวแยกเฟสออกจากเนื้อโฟมพลาสติก

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยหรือผงเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึง ค่าความทนแรงกด และค่าความสามารถในการคืนตัวมีค่าลดลงขึ้น ในขณะที่ค่าการคืบ มีค่าสูงขึ้น

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ฯ

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 4172437723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD : PLASTIC FOAM/ CELLULOSE FIBER/ CELLULOSE POWDER

WATCHARIN LAI : EFFECT OF CELLULOSE FIBERS ON THE MECHANICAL

PROPERTIES OF LOW DENSITY POLYETHYLENE FOAM. THESIS ADVISOR :

ASSOC. PROF. ONUSA SARAVARI, THESIS COADVISOR : DR. DUANGHATHAI

PENTRAKON, 120 pp. ISBN 974-03-0388-9

The effect of cellulose fiber and powder from cotton and coir fibers on the mechanical properties of low density polyethylene were studied. The foams with 1 – 3% of cellulose fibers and 3% of cellulose powders by weight were prepared by compression molding. The cellular structure, physical property and mechanical properties were characterized.

The result showed that the relative density of all foam samples were nearly identical. Using scanning electron microscopy technique, it was found that the open cell content and cell size increased with increasing cellulose fibers and powders content. At the same content of cellulose fibers and powders, the cellulose powder-mixed foams had open cell content and cell size more than cellulose fiber-mixed foams whereas cellulose powders were found to have better dispersion in plastic foam matrix than cellulose fibers. Comparison between the different cellulose fibers it was found that, cotton fiber-mixed foams and cotton powder-mixed foams had open cell content and cell size more than coir fiber-mixed foams and coir powder-mixed foams. Meanwhile, fiber and powder from coir fiber were found to have better dispersion in plastic foam matrix than fiber and powder from cotton fiber. Moreover, there was no interphase bonding between the cellulose fibers (powders) and polymer phase.

Mechanical tests showed that the tensile strength, compression deflection and compression set decreased with increasing cellulose fibers and powders content whereas the compression creep increased.

Department MATERAIL SCIENCE

Student's signature .....

Field of study Applied of Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature .....

Academic year 2001

Coadvisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือและการแนะนำทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณ รศ. อรุณา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ รศ. ไพพรรณ สันติสุข และ อาจารย์รัชนี ศิริสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและแนวคิดซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในการวิจัย และ บริษัท ไทยนามพลาสติก จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารประกอบอะไซไดคาร์บอนาไมด์ในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และมีตรสหายทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาการทั้งหลายให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

## สารบัญ

หน้า

|                         |   |
|-------------------------|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....    | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ.....    | ฉ |
| สารบัญ.....             | ช |
| สารบัญตาราง.....        | ญ |
| สารบัญรูป.....          | ฎ |

### บทที่

|  |    |
|--|----|
| 1 บทนำ.....  | 1  |
| 2 วารสารปริทัศน์.....                                      | 3  |
| 2.1 โฟมพลาสติก.....  | 3  |
| 2.1.1 กระบวนการเกิดโฟม.....                                | 5  |
| 2.1.2 โครงสร้างเซลล์ลูลาร์.....                            | 8  |
| 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก.. | 9  |
| 2.2 สารตั้งต้น.....  | 11 |
| 2.2.1 สารตั้งต้น.....                                      | 11 |
| 2.2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....                 | 11 |
| 2.2.1.2 สารฟู.....   | 12 |
| 2.2.1.3 สารเชื่อมขวาง.....                                 | 16 |
| 2.2.2 กระบวนการผลิตเชิงการค้า.....                         | 18 |
| 2.2.2.1 โฟมพอลิเอทิลีนแบบไม่มีการเชื่อมขวาง.....           | 18 |
| 2.2.2.2 โฟมพอลิเอทิลีนแบบมีการเชื่อมขวาง.....              | 19 |
| 2.2.3 สมบัติของโฟมพอลิเอทิลีน.....                         | 20 |
| 2.2.4 การใช้งาน.....                                       | 22 |
| 2.3 สารเสริมแรง.....                                       | 23 |
| 2.3.1 เส้นใยฝ้าย.....                                      | 25 |
| 2.3.2 เส้นใยมะพร้าว.....                                   | 25 |

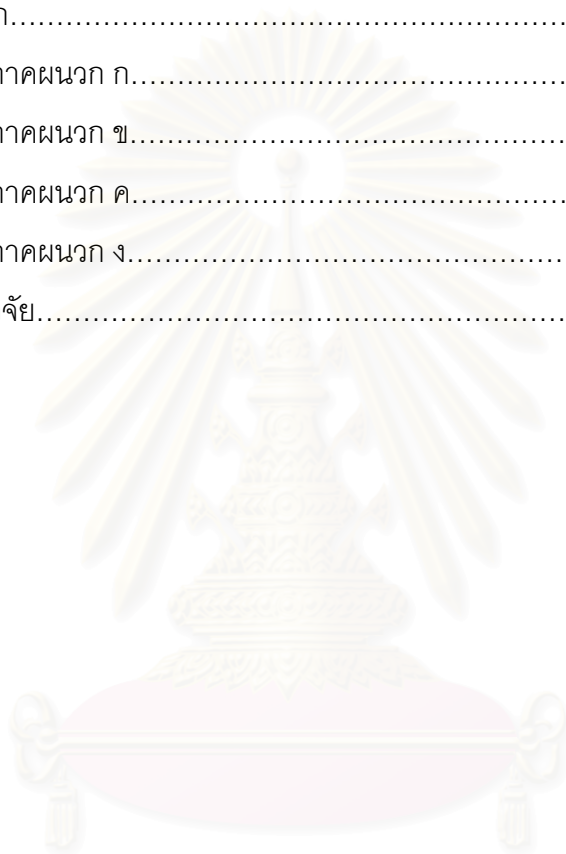
## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| 2.4 จุดประสงค์งานวิจัย.....   | 26   |
| 3 การทดลอง .....  | 28   |
| 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....   | 28   |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....  | 29   |
| 3.3 วิธีการทดลอง.....   | 32   |
| 3.3.1 การเตรียมแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ... 32                           | 32   |
| 3.3.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....                                   | 33   |
| 3.3.3 การเตรียมโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและ<br>ผงเส้นใยเซลลูโลส..... | 34   |
| 3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส.....                            | 35   |
| 3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟมตัวอย่าง.....  | 36   |
| 3.5.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของโฟม.....  | 36   |
| 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเซลล์.....   | 36   |
| 3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....   | 37   |
| 3.6.1 การทดสอบการคืบ.....   | 37   |
| 3.6.2 การทดสอบความสามารถในการคืนตัว.....  | 38   |
| 3.6.3 การทดสอบความทนแรงกด.....  | 38   |
| 3.6.4 การทดสอบความทนแรงดึง.....   | 39   |
| 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง.....   | 41   |
| 4.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส.....                                    | 41   |
| 4.2 สมบัติทางกายภาพของโฟมตัวอย่าง.....  | 44   |
| 4.2.1 ความหนาแน่นของโฟม.....  | 44   |
| 4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์.....  | 45   |
| 4.3 สมบัติเชิงกลของโฟมพลาสติก.....  | 54   |
| 4.3.1 การคืบ.....   | 54   |
| 4.3.2 ความสามารถในการคืนตัว.....  | 61   |
| 4.3.3 ความทนแรงกด.....  | 62   |
| 4.3.4 ความทนแรงดึง.....   | 69   |



สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                              | หน้า |
|------------------------------------|------|
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 71   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....            | 71   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                | 72   |
| รายการอ้างอิง.....                 | 73   |
| ภาคผนวก.....                       | 76   |
| ภาคผนวก ก.....                     | 77   |
| ภาคผนวก ข.....                     | 80   |
| ภาคผนวก ค.....                     | 83   |
| ภาคผนวก ง.....                     | 86   |
| ประวัติผู้วิจัย.....               | 87   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

|              |  | หน้า |
|--------------|--|------|
| ตารางที่ 2.1 | สารฟูที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีน.....          | 13   |
| ตารางที่ 2.2 | ส่วนประกอบทางเคมีของฝ้าย.....                          | 25   |
| ตารางที่ 2.3 | ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว.....                 | 26   |
| ตารางที่ 3.1 | สมบัติของเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ..... | 28   |
| ตารางที่ 3.2 | สูตรที่ใช้ในการเตรียมโฟม.....                          | 35   |
| ตารางที่ 4.1 | ขนาดของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส.....                  | 41   |
| ตารางที่ 4.2 | ค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่าง.....                      | 44   |
| ตารางที่ 4.3 | โครงสร้างเซลล์ของโฟมตัวอย่าง.....                      | 50   |
| ตารางที่ 4.4 | ค่า $n$ ที่ใช้ในสมการของ Mill และ Gilcrist.....        | 57   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

|             | หน้า  |
|-------------|---|
| รูปที่ 2.1  | สัณฐานโครงสร้างเซลล์..... 4   |
| รูปที่ 2.2  | แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม.....7   |
| รูปที่ 2.3  | การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนาน<br>กับทิศทางการเกิดโฟม..... 10 |
| รูปที่ 2.4  | โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ..... 11                              |
| รูปที่ 2.5  | ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบ<br>อะซิไดคาร์โบนาไมด์..... 16  |
| รูปที่ 2.6  | โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบไดควิมิลเปอร์ออกไซด์.....17                               |
| รูปที่ 2.7  | ขั้นตอนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนแบบไม่มีการเชื่อมขวาง.....18                              |
| รูปที่ 2.8  | ผลของการเชื่อมขวางต่อพฤติกรรมขณะหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน..... 19                        |
| รูปที่ 2.9  | ขั้นตอนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบใช้สารประกอบเคมี..... 19                 |
| รูปที่ 2.10 | ขั้นตอนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบการฉายรังสี..... 20                      |
| รูปที่ 2.11 | ผลของความหนาแน่นต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน.....21                               |
| รูปที่ 2.12 | ผลของจำนวนเซลล์แบบเปิดต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน.....21                         |
| รูปที่ 2.13 | ผลของการเรียงตัวของเซลล์ต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน..... 22                      |
| รูปที่ 3.1  | เครื่อง Two-Roll Mill LRM150 LAB TECH ENGINEERING..... 29                             |
| รูปที่ 3.2  | อุปกรณ์ช่วยในการผสมสำหรับเครื่อง Two-Roll Mill.....30                                 |
| รูปที่ 3.3  | เครื่อง Compression Mouldig.....30  |
| รูปที่ 3.4  | อุปกรณ์ทดสอบ Compression Set..... 31  |
| รูปที่ 3.5  | อุปกรณ์ทดสอบ Compression Creep..... 31  |
| รูปที่ 3.6  | แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมพลาสติก..... 33  |
| รูปที่ 3.7  | อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผงเส้นใยเซลลูโลส..... 34                                      |
| รูปที่ 3.8  | เครื่อง SEM รุ่น JSM 5410LV ของ JEOL..... 37  |
| รูปที่ 3.9  | เครื่อง Universal Testing Machine แบบ L500 ของ LLOYD..... 39                          |
| รูปที่ 3.10 | เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) แบบ IOII/Series IX ของ Instron.....40             |
| รูปที่ 3.11 | ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง..... 40   |
| รูปที่ 4.1  | ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยฝ้ายดิบ.....42   |
| รูปที่ 4.2  | ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยมะพร้าว.....42   |

สารบัญภาพ (ต่อ)

|             | หน้า  |
|-------------|---|
| รูปที่ 4.3  | ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยฝ้ายดิบ..... 43  |
| รูปที่ 4.4  | ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยมะพร้าว..... 43  |
| รูปที่ 4.5  | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ..... 45  |
| รูปที่ 4.6  | ภาพถ่าย SEM ของก้อนเส้นใยฝ้ายดิบในโฟมพลาสติก.....46   |
| รูปที่ 4.7  | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 1%โดยน้ำหนัก... 46                          |
| รูปที่ 4.8  | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 2%โดยน้ำหนัก... 47                          |
| รูปที่ 4.9  | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 %โดยน้ำหนัก.. 47                          |
| รูปที่ 4.10 | ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยมะพร้าวในเนื้อโฟมพลาสติก..... 48   |
| รูปที่ 4.11 | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 1%โดยน้ำหนัก.. 49                           |
| รูปที่ 4.12 | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 2%โดยน้ำหนัก.. 49                           |
| รูปที่ 4.13 | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3%โดยน้ำหนัก.. 50                           |
| รูปที่ 4.14 | ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยฝ้ายดิบในโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ<br>ปริมาณ 3%โดยน้ำหนัก..... 51 |
| รูปที่ 4.15 | ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยมะพร้าวในโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว<br>ปริมาณ 3%โดยน้ำหนัก..... 52 |
| รูปที่ 4.16 | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ<br>3%โดยน้ำหนัก..... 53                   |
| รูปที่ 4.17 | ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าวปริมาณ<br>3%โดยน้ำหนัก..... 53                   |
| รูปที่ 4.18 | พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบ<br>ด้วยน้ำหนัก 5 กก..... 54                  |
| รูปที่ 4.19 | พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบ<br>ด้วยน้ำหนัก 10 กก..... 55                 |
| รูปที่ 4.20 | พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบ<br>ด้วยน้ำหนัก 15 กก..... 55                 |
| รูปที่ 4.21 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบของโฟม LDPE จากการทดลองกับค่าจากการ<br>คำนวณ..... 57            |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 4.22 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....   | 58 |
| รูปที่ 4.23 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวภายใต้น้ำหนัก 5 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....   | 58 |
| รูปที่ 4.24 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....  | 59 |
| รูปที่ 4.25 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวภายใต้น้ำหนัก 10 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....  | 59 |
| รูปที่ 4.26 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบภายใต้น้ำหนัก 15 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....  | 60 |
| รูปที่ 4.27 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวภายใต้น้ำหนัก 15 กก.จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ.....  | 60 |
| รูปที่ 4.28 | ค่า % Compression Set ของโฟมตัวอย่าง.....   | 61 |
| รูปที่ 4.29 | ความทนแรงกดของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสแต่ละตัวอย่าง.....   | 63 |
| รูปที่ 4.30 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contributioun กับค่า Compressive Strain ของโฟม LDPE ...   | 64 |
| รูปที่ 4.31 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contributioun กับค่า Compressive Strain ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 1%โดยน้ำหนัก..... | 65 |
| รูปที่ 4.32 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contributioun กับค่า Compressive Strain ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 2%โดยน้ำหนัก..... | 65 |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 4.33 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก.....   | 66 |
| รูปที่ 4.34 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก..... | 66 |
| รูปที่ 4.35 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก.....   | 67 |
| รูปที่ 4.36 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก.....   | 67 |
| รูปที่ 4.37 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก.....   | 68 |
| รูปที่ 4.38 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก..... | 68 |
| รูปที่ 4.39 | ค่าความทนแรงดึงของโพลีพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นเซลลูโลสแต่ละตัวอย่าง.....   | 70 |

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) อย่างแพร่หลาย โดยเกือบครึ่งหนึ่งนำไปใช้ผลิตแผ่นฟิล์มสำหรับห่อของหรืออาหาร ถุงพลาสติก ผ้า พลาสติกกันน้ำ ผ้าพลาสติกปูโต๊ะ ของใช้ในครัวเรือน ของเด็กเล่น ฉนวนหุ้มลวด ไฟฟ้า และพลาสติกในงานก่อสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการผลิตในรูปของโฟมพลาสติก (plastic foam) ซึ่งโฟมพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำส่วนใหญ่นำไปใช้งานประเภทเครื่องรองรับน้ำหนักหรือกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันความเสียหายระหว่างการขนส่ง แต่โฟมพลาสติกชนิดนี้มีข้อจำกัดเรื่องของสมบัติเชิงกล เช่น มีความแข็งแรง ความทนแรงดึง ความทนแรงกด และความทนแรงกระแทกต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนหรือพอลิสไตรีน จึงมีการนำไปใช้ในงานไม่แพร่หลายนัก

อย่างไรก็ดีได้มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมุ่งศึกษาเกี่ยวกับผลของชนิดของสารฟลู ปริมาณของสารฟลู ชนิดของสารเชื่อมขวาง ปริมาณของสารเชื่อมขวาง และเทคนิคในการขึ้นรูปโฟมต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งผลการทดลองพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จึงมีแนวความคิดที่ว่านอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้วน่าจะมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลหรือสามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมชนิดดังกล่าวได้ ปัจจัยหนึ่งได้แก่ การนำเส้นใยเซลลูโลสมาใช้เสริมแรง ซึ่งก่อนหน้านี้นักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าทดลองใช้เส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติในการเสริมแรงพลาสติกและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น การเสริมแรงพอลิเอทิลีนด้วยเส้นใยจากต้นปอกระเจา การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยมะพร้าว การเสริมแรงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเส้นใยจากใบสับปะรด เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงกด (compressive strength) การหดตัว (shrinkage) ความทนแรงกระแทก (impact strength) และความทนแรงดึง (tensile strength) ของพลาสติกชนิดต่างๆ ได้

งานวิจัยนี้จึงศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเส้นใยที่นำมาใช้



ได้แก่ เส้นใยจากฝ้ายดิบ และเส้นใยจากกามมะพร้าว เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้เป็นวัสดุที่มีราคาต่ำ เมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์หรือสารเสริมแรงอื่นๆ และหาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งถ้าเส้นใยเหล่านี้สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้แก่โฟมพลาสติกที่เตรียมได้ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ตัวเส้นใยด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎี และวารสารปริทรรศน์

#### 2.1 โฟมพลาสติก (Plastic Foams)

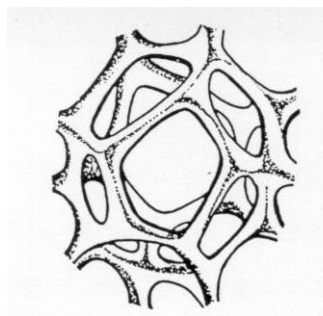
โฟมพลาสติก หรือ เซลลูลาร์พลาสติก (cellular plastics) หรือ โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) หรือ เอ็กซ์แพนเดดพลาสติก (expanded plastic) หมายถึง พลาสติกที่สามารถถูกทำให้ขยายตัวหรือพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วยเฟส (phase) ตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป คือ เฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (solid polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (blowing agent) [1] และกระจายตัวในเฟสพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (void) เรียกว่าเซลล์ (cell) [2] สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว หรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้อาจมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ ตัวเติม (fillers) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก หรือโลหะ หรือสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

โฟมพลาสติกอาจยืดหยุ่น (flexible) หรือ แข็ง (rigid) ขึ้นกับ อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ปริมาณผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้โฟมพลาสติกอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semiflexible) หรือ กึ่งแข็ง (semirigid) ก็ได้

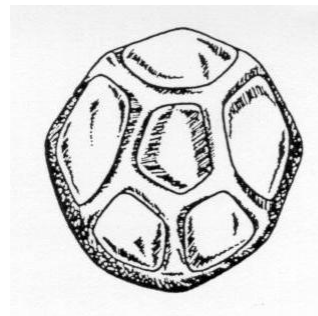
โฟมพลาสติกมีพื้นฐานโครงสร้าง (structural configurations) 2 แบบ [3] คือ

ก) แบบเซลล์เปิด (open-cell type) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ซึ่งแก๊สสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1ก) โดยทั่วไปโฟมที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบนี้จะยืดหยุ่นเหมาะในการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ที่นอน และฉนวนกันเสียง

ข) แบบเซลล์ปิด (closed-cell type) พื้นฐานโครงสร้างแบบนี้เซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบางๆ เรียกว่าหน้าตางเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1ข) โฟมแบบนี้จะแข็งและเหมาะในการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน



ก) แบบเซลล์เปิด



ข) แบบเซลล์ปิด

รูปที่ 2.1 สัณฐานโครงสร้างของเซลล์ [1]

การทำให้พลาสติกเกิดโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

ก) การสลายตัวของสารฟูจากทำให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ผลผลิตที่ได้ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

ข) การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว หรือ สารละลายพอลิเมอร์ หรือ สารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยตัวเร่งและ/หรือความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก

ค) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อน ตัวอย่างของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น

ง) การกลายเป็นไอของแก๊สซึ่งเป็นผลจากกระบวนการคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานาต (isocyanate) กับน้ำได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิต

จ) การขยายตัวของแก๊ส (gas expansion) ในเนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์

ฉ) การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow microspheres) ในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งไมโครสเฟียร์อาจจะม็องค์ประกอบเป็น เม็ดแก้ว หรือ เม็ดพลาสติก

ช) การขยายตัวของเม็ดแก้วในเนื้อพอลิเมอร์โดยใช้ความร้อนหรือความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การขยายตัวของเม็ดพอลิสไตรีนในระบบพอลิยูรีเทน หรือ อีพ็อกซีเรซิน

### 2.1.1 กระบวนการการเกิดโฟม (Foam Formation)

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการเอ็กซ์แพนชัน (expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble Formation or Initiation) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรก ของกระบวนการการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว กระบวนการการเกิดฟองนี้จะเรียกว่า nucleation [4] ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน [1] คือ

ก) Self nucleation – ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

ข) Nucleation process - ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่า nucleating agent

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ คุณลักษณะของผิวของอนุภาคตัวเติม ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวหรือขนาดของ nucleator ขนาดและปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension)

ในขั้นตอนการเกิดฟองสารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ ( $F$ ) ของระบบที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.1

$$F = \gamma A \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ  $A$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (total interfacial area) โดยที่ค่าแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble Growth) การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้สภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่ผิวสัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมีของฟอง ( $r$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น (growing) การแตกของผนังเซลล์ (breaking the wall separating cells) หรือการแพร่ของสารฟูกจากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังฟองที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta P_{1,2}$  คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ

ในขณะที่เกิดการขยายตัวของฟองในโฟมพลาสติก สมบัติต่างๆ ของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองจะขึ้นกับ สมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟส ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟูก ความดันภายนอกที่เกิดบนโฟมพลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟูกในเฟสพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณเชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโฟมพลาสติก

ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรของฟอง (Bubble Stability) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยหนึ่งคือการถ่ายเท (drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีก ของเหลวจะเกิดการถ่ายเทไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไป จะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ และถ้าทำให้ระบบโฟมขณะนี้เสถียร จะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์เปิด

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [1] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของเหลวไปรอยต่อระหว่างเซลล์ (drainage effect) ซึ่งการทำให้ความหนืดของเฟสพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

นอกจากนี้มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความเสถียรของโฟม [5] ได้แก่

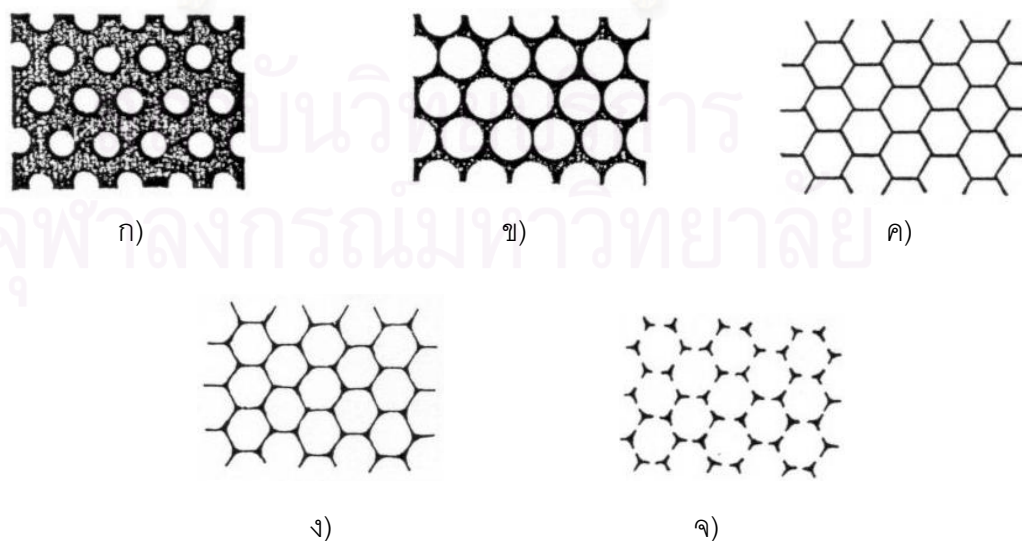
ก) การขยายตัวของฟองที่มากเกินไป (excessive expansion) ทำให้เกิดสัญญาณโครงสร้างแบบเซลล์เปิดที่มากเกินไปจนความต้องการ ซึ่งแก้ไขได้โดยการจำกัดระดับการขยายตัวของโฟม

ข) การเกิดแรง แวน เดอร์ วาลส์ ระหว่างผิวหน้าของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีความหนาแน่นลง นำไปสู่การเกิดรอยแตกบนผนังเซลล์

ค) การลดลงของแรงตึงผิวที่บางจุดในพอลิเมอร์เหลว อันเนื่องมาจากความร้อนในระบบพอลิเมอร์เหลวมีมากเกินไป หรือมีสารต้านการเกิดโฟม (antifoaming agents) ปนอยู่

วิธีทำให้สภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมีเช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์ [6]

จากขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟอง (nucleation) การเติบโต (growth) ของฟองแก๊สและการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ได้ดังรูปภาพที่ 2.2 โดยรูปที่ 2.2 ก) แสดงการเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลมในขั้นนี้ ข) แสดงการเติบโตของฟองแก๊ส ค) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรง pentagonal dodecahedron ง) ขั้นตอนนี้โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดซึ่งอาจจะเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น จ) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัญญาณโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด [7]



รูปที่ 2.2 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการการเกิดโฟม [7]



## 2.1.2 โครงสร้างเซลล์ (Cellular Structure)

ในการศึกษาโครงสร้างเซลล์ของโพลิเมอร์ สามารถศึกษาได้ 2 วิธี [1] คือ

ก) การศึกษาจากรูปภาพ (graphical approach) วิธีนี้เป็นการพิจารณาหาเหตุผลเพื่ออธิบายสมบัติมหภาค (macroscopic properties) ของโพลิเมอร์จากตัวแปรต่างๆ ทางด้านรูปร่างและโครงสร้างของเซลล์ เช่น geometry and stereometry ของเซลล์ ที่มีขนาด รูปร่าง และลักษณะเซลล์ต่างๆ กัน

ข) การศึกษาทางเคมีกายภาพ (physicochemical) วิธีนี้เป็นการอธิบายและทำนายรูปร่างลักษณะของโพลิเมอร์จากองค์ประกอบทางเคมีของโพลิเมอร์และกลไกในการเกิดโพลิเมอร์

โดยทั่วไปในระบบเซลล์หรือโพลิเมอร์แบบจำลอง (model) รูปร่างและโครงสร้างของเซลล์ได้มาจากการจำลองจากระบบจริง (real system) ของโพลิเมอร์ซึ่งเป็นรูปแบบอย่างง่าย และสามารถจำแนกได้หลายแบบ โดยข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการใช้จินตนาการและวิธีวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งในการจำแนกประเภทของโพลิเมอร์จะต้องพิจารณาถึงชนิด ขนาด และรูปร่างของเซลล์ ลักษณะการจัดตัว (packing) ของเซลล์ ขนาดและรูปร่าง (configuration) ของช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular cell) ซึ่งก็คือเนื้อโพลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นผนังเซลล์และ ribs ของเซลล์ ซึ่งมีผลกับสมบัติต่างๆ ของโพลิเมอร์

แบบจำลองรูปร่างและโครงสร้างของโพลิเมอร์สามารถจำแนกโดยอาศัยลักษณะการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของลูกบอล หรือทรงกลม (spheres) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยบอลหรือทรงกลมแต่ละอันจะแทนเซลล์จริงที่เกิดในโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามรูปแบบโครงสร้างแบบนี้ไม่สามารถนำมาอธิบายถึงสมบัติต่างๆ ของระบบจริงได้ โครงสร้างของโพลิเมอร์สามารถสรุปได้ 2 รูปแบบ คือ

ก) โครงสร้างของโพลิเมอร์ที่ระบบประกอบด้วยเซลล์ที่มีลักษณะทรงกลมทั้งหมด

ข) โครงสร้างของโพลิเมอร์ที่ขณะเริ่มต้นในระบบประกอบด้วยเซลล์ทรงกลมที่จะเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปหลายเหลี่ยม (polygons) ที่มีขนาด และรูปร่างต่างๆ กัน

สำหรับการวิเคราะห์รูปร่างของเซลล์ในระบบโพลิเมอร์ จะอาศัยรูปแบบทางเรขาคณิตในการอธิบายโดยใช้การวัดขนาดเซลล์และการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธีที่เหมาะสมเข้าช่วย หรือใช้การประเมินรูปร่าง (shape) เซลล์ส่วนใหญ่ด้วยการคาดคะเนทางสายตา สำหรับวิธีวิเคราะห์วิธีแรกรูปร่างของเซลล์จะสรุปได้ในเชิงปริมาณ (รูปร่างส่วนใหญ่) ในขณะที่วิธีที่สองนั้นจะได้ข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น รูปร่างเซลล์แบบทรงกลม วงรี (ellipse) หรือรูปหลายเหลี่ยม เป็นต้น ในระบบโพลิเมอร์โครงสร้างเซลล์จะประกอบด้วยเซลล์หลายรูปร่างและขนาด ซึ่งมีความซับซ้อนเกินกว่าจะสามารถคำนวณค่าการกระจายตัวของรูปร่าง (cell size distribution) ออกมาได้ ในขณะที่การคำนวณขนาดของเซลล์มีได้หลายวิธี ดังนั้นการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการ

นำไปใช้งานของโฟมจากรูปร่างเซลล์ (หรือขนาด) จะใช้รูปร่างเซลล์เฉลี่ยจากข้อมูลทางสถิติ หรือจากรูปร่างทางอุดมคติอย่างง่ายซึ่งจำลองมาจากโครงสร้างเซลล์ในระบบจริง (ข้อมูลได้มาจากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์พื้นฐานวิทยาของโฟมพลาสติกนั้น) ตัวอย่างเช่น monodispersed spheres, spheroids, cubes, hexagons, rhombic dodecahedrons, oblong pentagonon dodecahedrons, complex polyhedrons, capillaries เป็นต้น

### 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก (Structure-Properties Relationship)

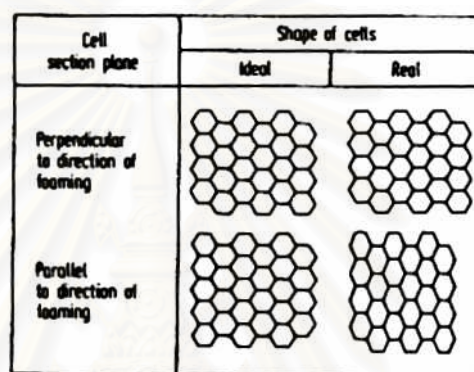
ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติกสามารถประเมินได้ในเชิงปริมาณ โดยปัจจัยพื้นฐานทางโครงสร้างมหภาค (macrostructural) ของโฟมจะถูกนำมาใช้อธิบายสมบัติของโฟม ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ปริมาณเซลล์แบบเปิดและแบบปิด ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ขนาดของเซลล์ รูปร่างของเซลล์ ความหนาของผนังเซลล์ (wall thickness) ค่าการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างของเซลล์ภายใต้ปริมาตรที่กำหนด และพื้นที่ผิวหน้าจำเพาะ (specific surface area) ของวัสดุ

โดยทั่วไปโฟมพลาสติกมีพื้นฐานโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบเซลล์เปิดและแบบเซลล์ปิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเฟสพอลิเมอร์และสภาวะการเกิดโฟม ความแตกต่างทางโครงสร้างทางกายภาพนี้ทำให้พอลิเมอร์โฟมมีสมบัติแตกต่างกันไป โดยสมบัติจะแปรผันไปตามสัดส่วนของเซลล์แบบเปิด เมื่อเปรียบเทียบโฟมแบบเซลล์เปิดกับโฟมแบบเซลล์ปิด พบว่าโฟมแบบเซลล์เปิดมีสมบัติการดูดซับน้ำและความชื้น การซึมผ่าน (permeability) ของแก๊สและไอน้ำ และความสามารถในการดูดซับเสียงได้ดีกว่า แต่จะมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้าที่ต่ำกว่าโฟมแบบเซลล์ปิด โดยทั่วไปโฟมพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์เปิด ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resins) และคาร์บาไมด์ (carbamide) เป็นต้น สำหรับโฟมพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ได้แก่ พอลิยูรีเทน อีพ็อกซีเรซิน ซิลิโคน พีวีซี พอลิสไตรีน เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสัดส่วนของเซลล์แบบเปิดและเซลล์แบบปิด เป็นดังนี้คือ เมื่อสัดส่วนของเซลล์แบบเปิดเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโฟมพลาสติกจะลดลง เนื่องจากโครงสร้างเซลล์แบบเปิดจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อค่าเฉลี่ยของขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์ในขั้นสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม นอกจากนี้โครงสร้างเซลล์แบบเปิดสามารถทำให้เกิดได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างเซลล์แบบปิดด้วยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการ

ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) การเพิ่มหรือลดความดันในระบบ โฟม การใช้ความร้อนหรือวิธีปฏิบัติทางกล (mechanical treatment)

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropy) ของรูปร่างเซลล์จะสัมพันธ์กับทิศทางการยืดหรือขยายตัวของเซลล์ฟองแก๊สในเฟสพอลิเมอร์ โดยเซลล์จะขยายตัวในทิศทางที่มีความเค้นเชิงกลต่ำ ความเค้นเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดโฟมซึ่งจะกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดทั่วทั้งปริมาตรของพอลิเมอร์ โดยทิศทางการขยายตัวของเซลล์สามารถขยายได้หลายทิศทางและทำมุมต่างๆ กันกับแนวระนาบ ตัวอย่างเช่น การขยายตัวของ dodecahedral cell ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนานกับทิศทางการเกิดโฟม

[1]

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของรูปร่างเซลล์ของโฟมพลาสติกจะมีผลต่อความแข็งแรง ความเป็นฉนวน สมบัติความร้อนเชิงกายภาพ (thermophysical) และสมบัติอื่นๆ ซึ่งสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางนี้จะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมพลาสติกมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ธรรมชาติทางเคมีของพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของโฟมพลาสติก หรือปริมาณเซลล์แบบเปิดในโฟมพลาสติก

ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการเกิดโฟมที่คล้ายคลึงกัน (องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น การจัดตัวของเซลล์ เป็นต้น) ขนาดของเซลล์จะมีอิทธิพลต่อสมบัติของโฟมพลาสติกได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะเมื่อเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นทั้งในโฟมแบบยืดหยุ่นและโฟมแบบแข็ง





2.2.1.2 สารฟู (Blowing Agents) สารฟูเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถผลิตแก๊ส แล้วทำให้เกิดโครงสร้างเซลล์ลูลาร์หรือโฟมขึ้นในเนื้อพลาสติก โดยทั่วไปสารฟูแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามกลไก (mechanism) หรือปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊ส ดังนี้

ก. สารฟูเชิงกายภาพ (Physical Blowing Agents) สารฟูประเภทนี้ให้แก๊สออกมาโดยการเปลี่ยนสถานะทางกายภาพ (physical state) ของตัวมันเอง ซึ่งโดยทั่วไปอาจเป็นแก๊ส ได้แก๊แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการเชิงกายภาพ เช่น การกลายเป็นไอ การdesorption หรืออาจเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ฮาโลจีเนเตดไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ สารประกอบอีเธอร์ เป็นต้น

สารฟูเชิงกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

(1) ของเหลวที่ระเหยได้ง่าย สารฟูกลุ่มนี้มีจุดเดือดต่ำและจะกลายเป็นแก๊สโดยการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือลดความดันในระบบ ตัวอย่างสารฟูกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบอะลิฟาติก ฮาโลจีเนเตดและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ สารประกอบอีเธอร์ สารประกอบคีโตน เป็นต้น

(2) ของแข็ง (solids sorbent) สารฟูในกลุ่มนี้จะเป็นระบบของของแข็งที่อิมมัลชันไปด้วยแก๊ส และจะให้แก๊สออกมาเมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ ตัวอย่างของของแข็งเหล่านี้ เช่น activated carbon ที่มีโครงสร้าง ultramicroporous แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ (clay) และสารประกอบจำพวกซิลิเกต เป็นต้น

ข. สารฟูเชิงเคมี (Chemical Blowing Agents) สารฟูประเภทนี้จะให้แก๊สออกมาโดยผ่านปฏิกิริยาเคมี เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรืออันตรกิริยา (interaction) ของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิด โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและย้อนกลับไม่ได้ (irreversible) แต่มีบางกรณีเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน [9]

สารฟูเชิงเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

(1) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่สามารถย้อนกลับได้ ตัวอย่างเช่น เกลืออินทรีย์และอนินทรีย์ของแอมโมเนีย สารประกอบไบคาร์บอเนต/คาร์บอเนตของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธ ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกลุ่มนี้แสดงได้ดังสมการ 2.4 เมื่อ AB - แทนสารฟู C - แทนส่วนที่เหลือ (residue) และ G - ผลผลิตที่เป็นแก๊ส



(2) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สามารถผันกลับได้ ตัวอย่างเช่น สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะลิฟาติกอะไซและไดอะไซ สารประกอบไดอะซิมีน เป็นต้น ปฏิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกุ่มนี้แสดงดังสมการที่ 2.5



ของผสมของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่ให้แก๊สโดยการทำให้แก๊สโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบ ตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างไซเดียมไนไตรต์กับแอมโมเนียมคลอไรด์ ของผสมของกรดโอเลอิกกับซิงค์คาร์บอเนต เป็นต้น ปฏิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกุ่มนี้แสดงดังสมการที่ 2.6



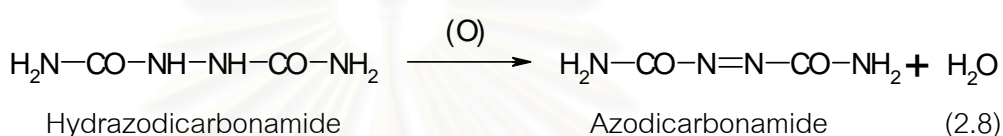
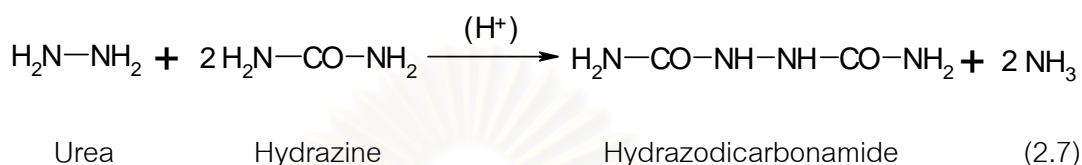
โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้สารฟูกุ่มหลายชนิดด้วยกันดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารฟูกุ่มที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีน [10]

| สารฟูกุ่ม   | อุณหภูมิสลายตัว<br>(องศาเซลเซียส) | ปริมาณแก๊สที่ให้<br>(มิลลิลิตรต่อกรัม) |
|---|-----------------------------------|--|
| Sodiumbicarbonate/ $\text{NaHCO}_3$   | 100-140                           | 125                                    |
| N,N'-Dimethyl-N,N'- dinitrosoterephthalamide<br>(DNTA)/ $\text{C}_6\text{H}_4\text{-(CON(CH}_3\text{)-NO)}_2$ | 118                               | 200                                    |
| 4-4'-oxybisbenzenesulfonylhydrazide(OBSH)/<br>$\text{O(C}_6\text{H}_4\text{-SO}_2\text{NH-NH}_2\text{)}_2$    | 130-140                           | 313                                    |
| Azobisbutyronitrile<br>(ABN)/ $(\text{CH}_3)_2(\text{CN})\text{CN}=\text{NC}(\text{CN})(\text{CH}_3)_2$       | 100                               | 137                                    |
| Azodicarbonamide(ADC)/ $\text{H}_2\text{N-CO-N=N-CONH}_2$   | 190-240                           | 270                                    |

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอกล่าวถึงแต่สารฟูกุ่มที่ใช้ในการทดลอง คือ สารประกอบอะไซไดคาร์บอนาไมด์ (azodicarbonamide) ซึ่งเป็นสารฟูกุ่มเชิงเคมีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีนเนื่องจากให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สในปริมาณสูง

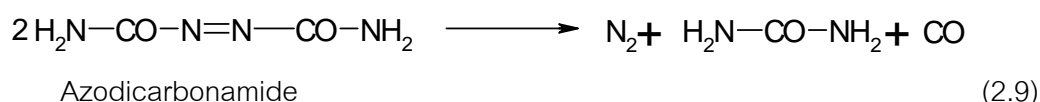
กระบวนการผลิตอะโซไดคาร์โบนาไมด์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบไฮดราซีน (hydrazine) กับสารประกอบยูเรีย (urea) ได้สารประกอบไฮดราโซไดคาร์โบนาไมด์ (hydrazodicarbonamide) ขั้นต่อมาสารประกอบไฮดราโซไดคาร์โบนาไมด์จะผ่านกระบวนการออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ (azodicarbonamide) ดังสมการ

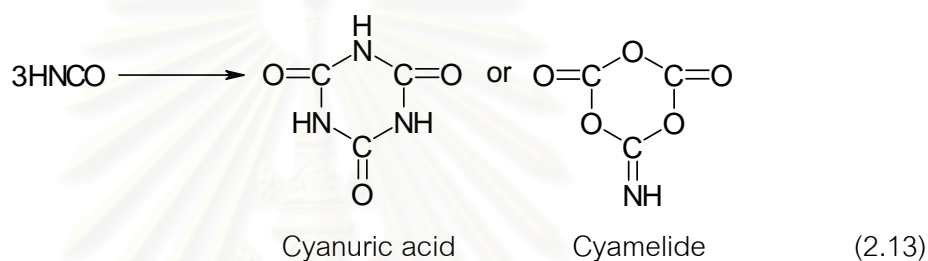
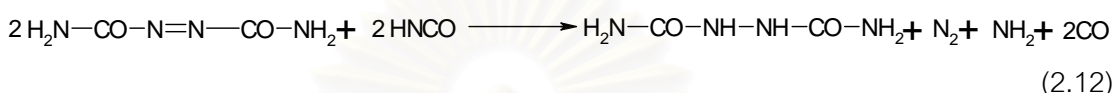
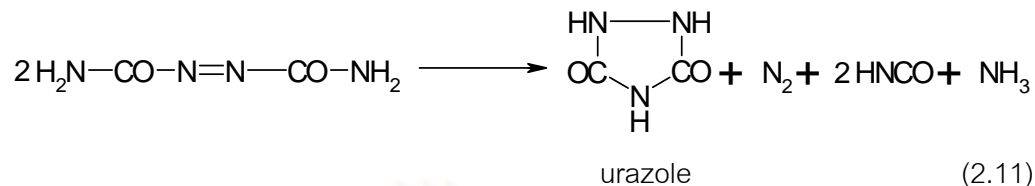
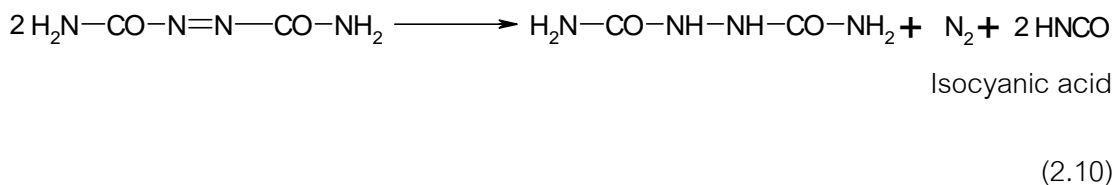


สารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์เป็นของแข็งที่มีสีส้มจนถึงสีเหลืองอ่อนขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค มีความหนาแน่นประมาณ 1.65 กรัม/ลบ.ซม. โดยทั่วไปจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ใดๆ แต่จะละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide) ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิสลายตัวในอากาศประมาณ 190-240 องศาเซลเซียส โดยปริมาณแก๊สที่ให้ออกมาประมาณ 270 มิลลิลิตร/กรัม และประกอบไปด้วย

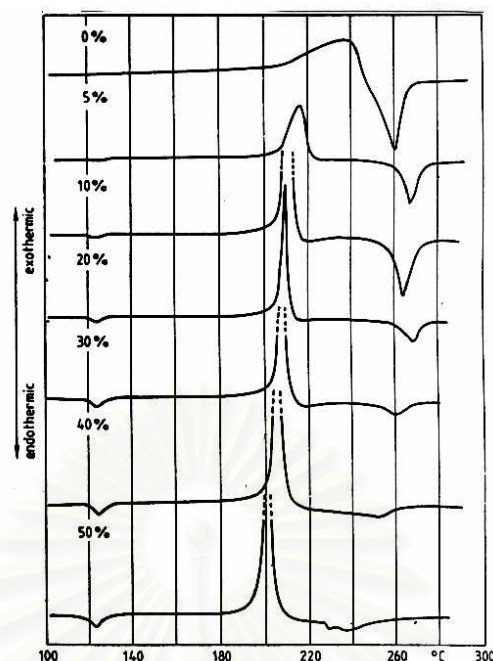
|   |    |                       |
|---|----|-----------------------|
| แก๊สไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )          | 65 | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
| แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)               | 32 | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
| แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) | 3  | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |

นอกจากนี้ผลผลิตจากการสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ยังประกอบไปด้วยของแข็ง (solid residues) ได้แก่ สารประกอบยูราโซล (urazole) กรดไซยานูริก (cyanuric acid) ไฮดราโซไดคาร์โบนาไมด์ (hydrazodicarbonamide) และสารประกอบไซยามีไลด์ (cyamelide) ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและสามารถเกิดได้หลายแบบ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [11]





ถึงแม้ว่าอุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะไซจะมีค่าสูงมาก แต่สามารถทำให้อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำลงได้ โดยวิธีที่ใช้กันทั่วไปคือ การใช้สารเติมแต่ง (additives) วิธีนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยสารเติมแต่งดังกล่าวเรียกว่าคิกเกอร์ (kicker) ได้แก่ สารประกอบพอลิออล สารประกอบยูเรีย สารประกอบอะมีน กรดอินทรีย์ เบสอินทรีย์ และสารประกอบโลหะ ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิตัวทางความร้อนของสารประกอบอะไซไดคาร์โบนาไมด์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือสารคิกเกอร์จะช่วยทำให้อุณหภูมิตัวทางความร้อนของสารประกอบอะไซไดคาร์โบนาไมด์ลดลงเมื่อปริมาณการใช้สารคิกเกอร์เพิ่มมากขึ้น



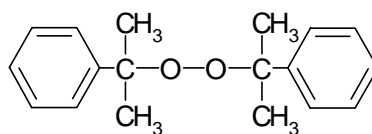
รูปที่ 2.5 ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะซิไดคาร์โบนาไมด์

[9]

นอกจากสารคิกเกอร์แล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะซิไดคาร์โบนาไมด์ ได้แก่ ขนาดอนุภาคของสารประกอบอะซิไดคาร์โบนาไมด์ และอัตราการให้ความร้อนขณะขึ้นรูปโฟม

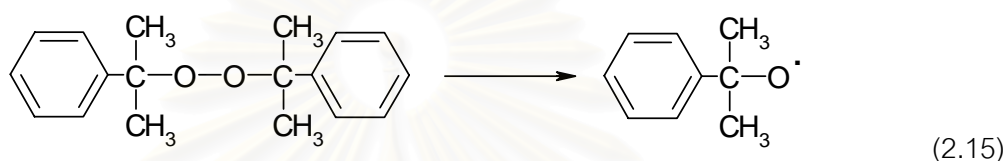
**2.2.1.3 สารเชื่อมขวาง (Crosslinking Agents)** การเชื่อมขวางในกระบวนการผลิตโฟมพลาสติกสามารถทำได้โดยการใส่สารเชื่อมขวางหรือการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หรือการฉายรังสีพลังงานสูง ในกระบวนการขยายตัวของโฟมนั้นจำเป็นต้องมีการเชื่อมขวางพองที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อทำให้พองที่ขยายตัวเสถียร นอกจากนี้การเชื่อมขวางยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องมาจากความร้อนของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย โดยทั่วไปสารเชื่อมขวางที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีน ได้แก่ สารประกอบไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



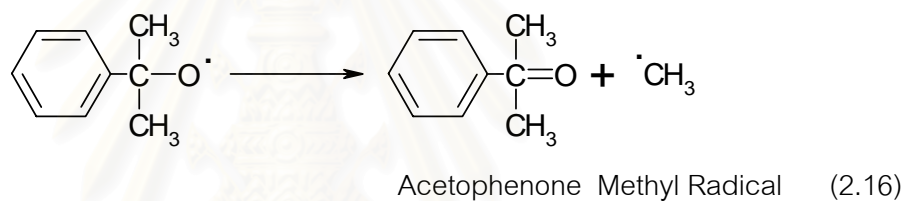


รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบไดควินิลเปอร์ออกไซด์

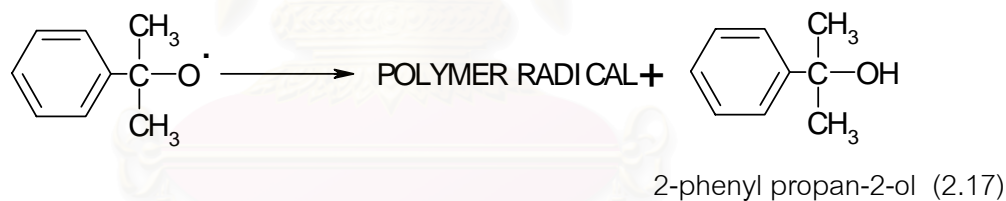
สารประกอบไดควินิลเปอร์ออกไซด์ เป็นสารเชื่อมขวางที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทีลีนเนื่องจาก อุณหภูมิสลายตัวมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทีลีนคือ ประมาณ 120 - 140 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของไดควินิลเปอร์ออกไซด์มีหลายแบบ แสดงในสมการที่ 2.15 - 2.19



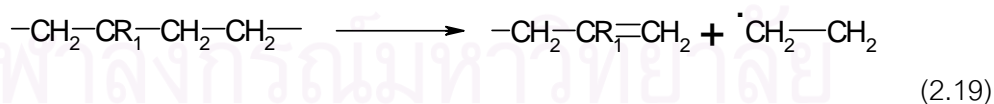
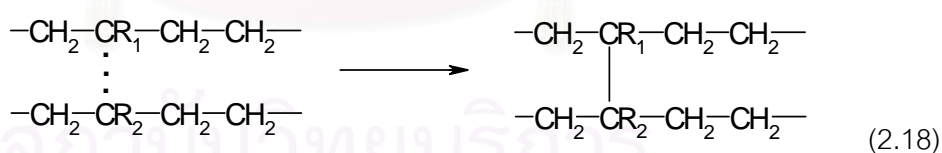
Peroxy Free Radical



Acetophenone Methyl Radical



2-phenyl propan-2-ol



สมการที่ 2.15 แสดงการสลายตัวทางความร้อนขั้นเริ่มต้นของไดควินิลเปอร์ออกไซด์ได้เป็นเปอร์ออกซีฟรีเรดิคัล (peroxy free radical) สมการที่ 2.16 แสดงการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุมูลอิสระจากสมการที่ 2.15 ได้เป็นอะซีโตนฟีโนน (acetophenone) และเมทิลเรดิคัล (methyl radical) กระบวนการเชื่อมขวางจะเริ่มจากเปอร์ออกซีฟรีเรดิคัลหรือเมทิลเรดิคัลไปจับตัวกับอะตอมของไฮโดรเจนบนสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดการรวมตัวกันได้พอลิเมอร์เรดิคัลและ

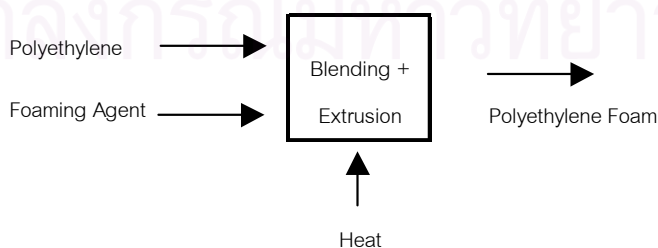
2-phenyl propan-2-ol ดังแสดงในสมการที่ 2.17 พอลิเมอร์เรดิคัลที่เกิดขึ้นสามารถรวมตัวกัน และเกิดการเชื่อมขวางแสดงได้ดังสมการที่ 2.18 หรืออาจเกิดการแตกตัว (cleave) และสลายตัว (degrade) ดังสมการที่ 2.19 ซึ่งการรวมตัวกันทั้ง 2 ลักษณะจะเกิดขึ้นพร้อมกันในระบบโพลิเมอร์

## 2.2.2 กระบวนการผลิตเชิงการค้า (Commercial Production and Processings)

โพลิเอทิลีนมีการใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของโพลิเอทิลีน เช่น มีความต้านทานต่อสารเคมีต่างๆ อย่างดีเยี่ยมทำให้เหมาะสำหรับใช้บรรจุอาหาร โฟมชนิดนี้มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์ปิด และสามารถผลิตให้มีความนุ่มคล้ายพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำแบบยืดหยุ่น หรือมีความแข็งคล้ายโพลิสไตรีนแบบแข็งก็ได้ โฟมโพลิเอทิลีนที่ผลิตในเชิงการค้ามีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดเอ็กซ์ทรูด (extruded) หรือแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และชนิดเชื่อมขวาง [4]

### 2.2.2.1 โฟมโพลิเอทิลีนแบบไม่มีการเชื่อมขวาง (Non-Crosslinking Polyethylene Foam)

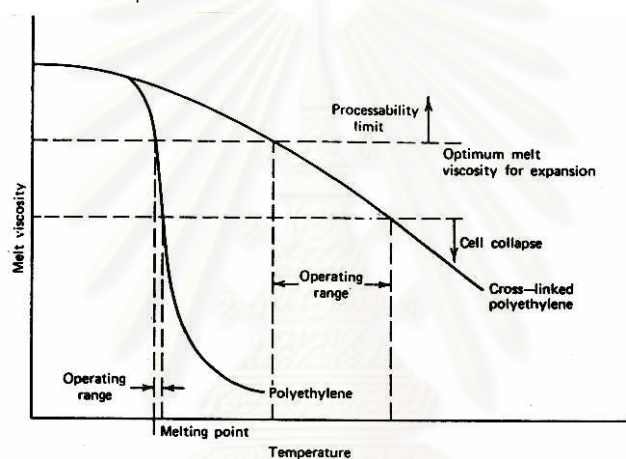
กระบวนการผลิตโฟมโพลิเอทิลีนชนิดเอ็กซ์ทรูดหรือแบบไม่มีการเชื่อมขวางจะเป็นแบบต่อเนื่องสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตเริ่มจากการผสมโพลิเอทิลีนขณะเหลวกับสารฟู (โดยปกติใช้ halogenated hydrocarbon gas) ภายใต้ความดันสูงและควบคุมอุณหภูมิในการผสม จากนั้นสารผสม (compound) จะถูกส่งผ่านออกทางหัวได (die) และสัมผัสกับความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดการขยายตัวของแก๊สก่อตัวเป็นเซลล์ ในขณะเดียวกันโพลิเอทิลีนเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวและแข็งตัวเกิดการกักแก๊สไว้ในแต่ละเซลล์ โดยระดับ การขยายตัว ขนาดของเซลล์ และการจัดเรียงตัวของเซลล์สามารถควบคุมได้โดยการปรับอัตราการไหล อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป อุณหภูมิเย็นตัว อัตราส่วนระหว่างแก๊สกับของเหลว และการลดลงของความดัน (pressure drop) ขณะพอลิเมอร์เหลวผ่านหัวได



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตโฟมโพลิเอทิลีนแบบไม่มีการเชื่อมขวาง [4]



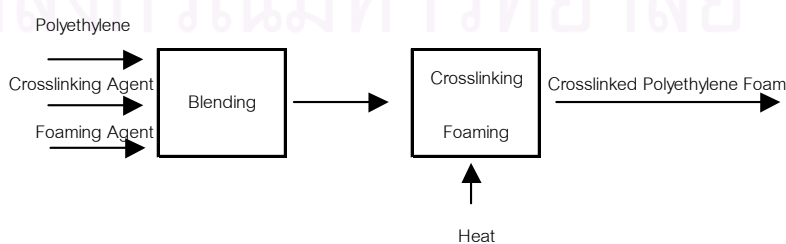
**2.2.2.2 โฟมพอลิเอทิลีนแบบมีการเชื่อมขวาง (Crosslinking Polyethylene Foam)** โฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางสามารถผลิตได้ทั้งจากกระบวนการแบบแบช (batch) และแบบต่อเนื่อง สาเหตุที่ต้องทำให้โฟมพอลิเอทิลีนมีการเชื่อมขวางในโครงสร้างโมเลกุล เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวสูงและความหนืดของพอลิเมอร์เหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว ทำให้การผลิตโฟมพอลิเอทิลีนที่ใช้สารฟูเชิงเคมีหรือสารฟูที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบทำได้ยาก เพราะจะเกิดการยุบตัวของโครงสร้างโฟมก่อนที่จะถูกทำให้เสถียร ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างโมเลกุลโฟมพอลิเอทิลีนก่อนทำให้เกิดโครงสร้างโฟม ซึ่งการเชื่อมขวางจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เหลวลดลงอย่างช้าๆ เหนือจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน และทำให้โฟมไม่เกิดการยุบตัวก่อนที่จะถูกทำให้เสถียร ผลของการเชื่อมขวางต่อพฤติกรรมขณะหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนแสดงได้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลของการเชื่อมขวางต่อพฤติกรรมขณะหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน [2]

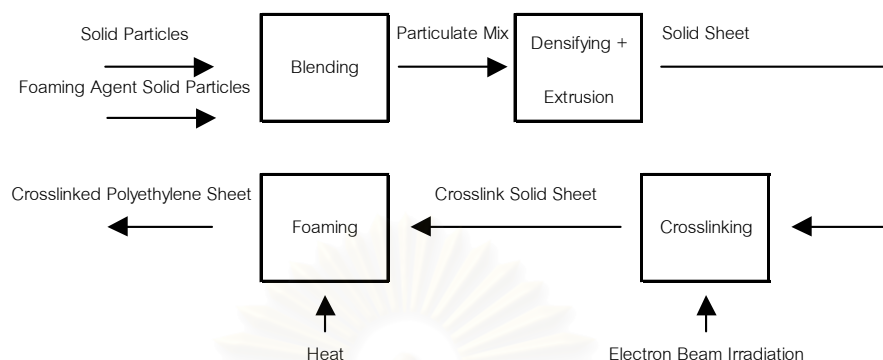
การทำให้เกิดการเชื่อมขวางในโฟมพอลิเอทิลีนมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่

(ก) ใช้สารประกอบเคมีซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ เช่น dicumyl peroxide, di-tert-butyl peroxide หรือสารประกอบเปอร์ออกไซด์อื่นๆ กระบวนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบใช้สารประกอบเคมีเป็นกระบวนการแบบแบช แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบใช้สารประกอบเคมี [4]

(ข) การฉายรังสี (irradiation) โดยปกติจะใช้รังสีเอกซ์หรืออิเล็กตรอน กระบวนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบนี้เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการผลิตโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางแบบการฉายรังสี [4]

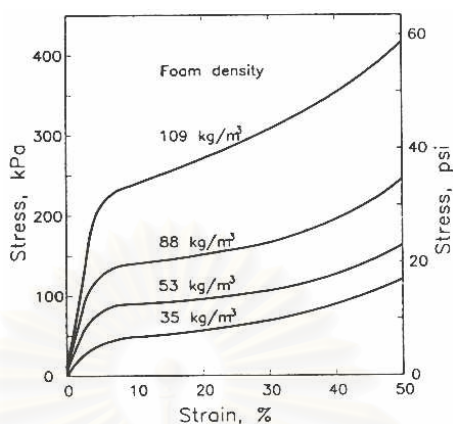
สมบัติทางเคมี ทางกล และทางความร้อนของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเอ็กซ์ทรูดและชนิดเชื่อมขวางจะคล้ายคลึงกันแต่สิ่งที่แตกต่างกันก็คือโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเชื่อมขวางจะมีขนาดเซลล์ที่เล็กและจัดตัวเป็นระเบียบมากกว่า นอกจากนี้โฟมชนิดเชื่อมขวางจะมีความนุ่มกว่าโฟมพอลิเอทิลีนชนิดเอ็กซ์ทรูด

### 2.2.3 สมบัติของโฟมพอลิเอทิลีน (Properties of Polyethylene Foam)

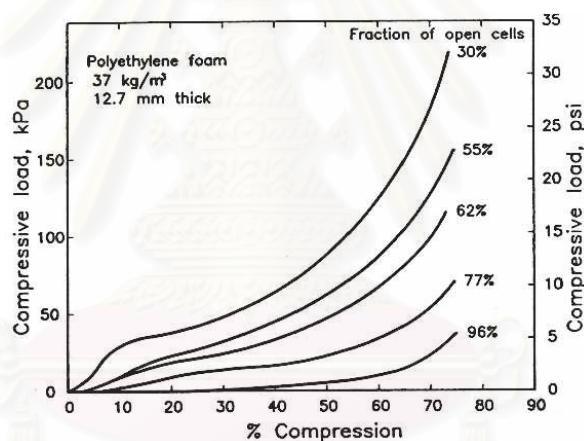
สมบัติต่างๆ ของโฟมพอลิเอทิลีนขึ้นกับโครงสร้างเซลล์ของตัวมันเอง โดยตัวแปรทางโครงสร้างเซลล์ที่สำคัญได้แก่ ความหนาแน่น ขนาดของเซลล์ เรขาคณิตของเซลล์ และปริมาณเซลล์แบบเปิด นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการผลิต สภาพะในการผลิตและการเชื่อมขวางก็มีผลต่อสมบัติของโฟมพอลิเอทิลีนเช่นกัน โดยตัวแปรดังกล่าวจะมีผลต่อความเป็นผลึก การเรียงตัวของโมเลกุล และสมบัติการไหลของฟอสโฟลิเมอร์ โดยกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะให้โฟมพอลิเอทิลีนที่มีขนาดและรูปร่างเซลล์ที่แตกต่างกัน

ในการใช้งานจริง โฟมพอลิเอทิลีนจะถูกกระทำจากแรง 3 ชนิด คือ แรงดึง (tension) แรงอัด (compression) และแรงเฉือน (shear) โดยแรงอัดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้โฟมพอลิเอทิลีนเกิดการเสียรูป รูปที่ 2.11 2.12 และ 2.13 แสดงผลของความหนาแน่น ปริมาณเซลล์แบบเปิด และการเรียงตัวของเซลล์ต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีนตามลำดับ จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าความทนแรงอัด (compressive strength) ของโฟมพอลิเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมมีค่าเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าปริมาณเซลล์แบบเปิดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีนลดลง และจากรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงสมบัติที่ขึ้นกับ

ทิศทางการขยายตัวของโฟมพอลิเอทิลีน โดยพบว่าความทนแรงอัดของโฟมในทิศทางที่ขนานกับทิศทางการขยายตัวจะสูงกว่าในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการขยายตัว

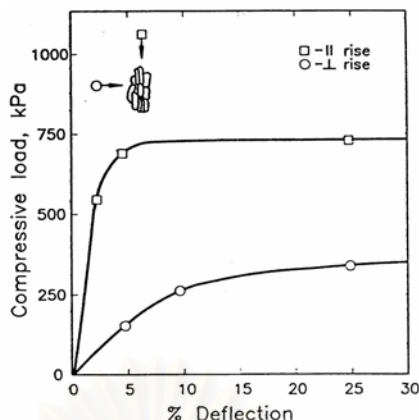


รูปที่ 2.11 ผลของความหนาแน่นต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน [1]



รูปที่ 2.12 ผลของปริมาณเซลล์แบบเปิดต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน [1]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 ผลของการเรียงตัวของเซลล์ต่อความทนแรงอัดของโฟมพอลิเอทิลีน [1]

## 2.2.4 การใช้งาน (Applications)

พอลิเอทิลีนโฟมมีการนำไปใช้ในงานหลายประเภท ซึ่งจะกล่าวพอสังเขปดังนี้

(ก) เครื่องรองรับน้ำหนักหรือกันกระแทก (Cushion Packaging) โฟมที่นำมาใช้ในงานประเภทนี้ ควรมีสสมบัติยืดหยุ่น (flexible) ซึ่งจะให้สมบัติการดูดซับพลังงานที่ดีอันเป็นสมบัติสำคัญสำหรับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ควรทนแรงกระแทกได้ดี และสามารถบรรเทาแรงกระแทก (shock) จากภายนอกได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น เบาะหรือที่นั่งในรถยนต์ เฟอรินิเจอร์ ฟูกและหมอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้งานประเภทบรรจุภัณฑ์กันกระแทกเพื่อป้องกันสินค้าเสียหายระหว่างการขนส่ง

(ข) ฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation) โฟมที่นำมาใช้งานประเภทนี้ควรเป็นโฟมที่มีความแข็งและมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ฉนวนกันความร้อนในตู้เย็น และใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น

(ค) ส่วนประกอบทางโครงสร้าง (Structural Component) โฟมประเภทนี้นิยมนำมาใช้ทดแทนวัสดุจำพวกไม้ โลหะ หรือพลาสติก เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียง และน้ำหนักเบา

(ง) การนำไปใช้งานด้านทะเล (Marine Application) โฟมที่นำมาใช้งานประเภทนี้ต้องมีสมบัติทนต่อความชื้น โดยทั่วไปควรมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด มีความหนาแน่นต่ำ โดยที่สมบัติดังกล่าวจะทำให้โฟมลอยน้ำได้ ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเรือขนาดเล็กและขนาดใหญ่ หรือทำทุ่นลอยน้ำ เป็นต้น

(จ) การนำไปใช้งานประเภทอื่นๆ (Miscellaneous) ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ป้องกันผิวหน้าของสินค้า ฉนวนไฟฟ้า ปะเก็น (gasketing) วัสดุกันรั่ว (sealing) ส่วนประกอบในรถยนต์ ส่วนประกอบของถนน ส่วนประกอบของสะพาน เป็นต้น

## 2.3 สารเสริมแรง (Reinforcements)

สารเสริมแรงเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่ง ที่ทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทางกายภาพให้แก่วัสดุพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงอัด ความทนแรงกระแทก เป็นต้น โดยทั่วไปสารเสริมแรงส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ และมีบ้างที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ สารเสริมแรงควรมีความแข็งแรงและความแข็งมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ โดยหลักการ สารเสริมแรงที่ใช้จะมีรูปร่างหลายแบบ เช่น ผง อนุภาคทรงกลม เกล็ด เส้นใย เป็นต้น โดยสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยจะให้สมบัติการเสริมแรงที่สูงกว่ารูปร่างอื่นๆ ซึ่งเส้นใยอาจอยู่ในรูปของเส้นใยยาว หรือเส้นใยสั้นก็ได้

เส้นใยที่นิยมใช้เสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม ได้แก่

ก. เส้นใยแก้ว (Glass Fibers) เส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงอย่างกว้างขวาง เพราะมีราคาถูก และมีข้อดี คือ มีความอยู่ตัวหรือคงตัวของรูปร่าง มีความต้านทานต่อการสึกกร่อน มีความต้านทานต่อความร้อน ขึ้นรูปได้ง่าย มีความทนต่อแรงดึง ทนต่อสารเคมี ทนต่อแรงกระแทก และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

เส้นใยแก้วสามารถแบ่งได้เป็นหลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยชนิดยาว เส้นใยชนิดสั้น เส้นใยชนิดเส้นด้าย เป็นต้น และนอกจากนี้เส้นใยแก้วก็ยังมีอีกหลายเกรดซึ่งมีสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป เช่น E-glass S-glass A-glass เป็นต้น [12]

ข. เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เส้นใยคาร์บอนที่ใช้เสริมแรงจะอยู่ในรูปของเส้นใยสั้น สามารถเตรียมได้จาก polyacrylonitrile หรือจาก pitch ซึ่งเส้นใยคาร์บอนทั้ง 2 ชนิด จะมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป โดยเส้นใยจาก pitch จะมีสมบัติทางกลที่ดีน้อยกว่าและมีราคาสูงกว่า การนำเส้นใยคาร์บอนไปใช้งานจะคำนึงถึงสมบัติการนำไฟฟ้ามากกว่าสมบัติเชิงกลของมัน

ค. เส้นใยพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic Polymeric Fibers) เส้นใยประเภทนี้ ได้แก่ เส้นใยอะรามิด (aramid) และเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเส้นใยเพทโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในรูปของเส้นใยสั้น ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจะนำไปใช้งานประเภทที่ต้องการความทนต่อการขีดถู ในขณะที่เส้นใยเพทจะนิยมใช้ผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความทนต่อแรงกระแทกและลดต้นทุนการผลิต

ง. เส้นใยแร่ (Mineral Fibers) ตัวอย่างของเส้นใยกลุ่มนี้ได้แก่ เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) ซึ่งเป็นเส้นใยที่นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในอดีต จนกระทั่งปี 1975 ได้มีกฎหมายห้ามใช้เส้นใยชนิดนี้ เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวมีผลในทางลบต่อสุขภาพเมื่อมีการหายใจเอาเศษเส้นใยเข้าไป นอกจากนี้ยังมีเส้นใยวอลลาสโตไนต์ (wallastonite) และเส้นใยแคลเซียมซิลิเกต (calcium



silicate) ซึ่งมีสมบัติในการช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบติดโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplate) ให้แก่วัสดุพอลิเมอร์

จ. เส้นใยโลหะ (Metal Fibers) เส้นใยกลุ่มนี้ได้แก่ เส้นใยแอสแตนเลสสตีล และเส้นใยอะลูมิเนียม เส้นใยเหล่านี้ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแก่วัสดุพอลิเมอร์ แต่จะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านไฟฟ้าให้แก่วัสดุ เช่น electrostatic charge dissipation, electro magnetic sheilding เป็นต้น

ฉ. เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers) เส้นใยเซรามิกได้แก่ เส้นใยอะลูมินา เส้นใยโบรอน เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ และเส้นใยอะลูมินาซิลิเกต เป็นต้น เส้นใยกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้กับฟลูออโรพอลิเมอร์และเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบเหล่านี้จะใช้ในอุตสาหกรรมการบิน และชิ้นส่วนอุปกรณ์เคมีเป็นหลัก

ช. เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนประกอบของพืชซึ่งมีเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก เส้นใยธรรมชาติแบ่งออกไปได้เป็น 4 กลุ่มตามส่วนประกอบของพืชที่นำมาทำเป็นเส้นใย [2] ได้แก่

(1) เส้นใยจากใบ (Leaf-Fibers) ได้จากใบของพืชจำพวกใบเลี้ยงเดี่ยวซึ่งเป็นพืชในเขตร้อน ได้แก่ ป่านมะนิลา (manila hemp) เส้นใยจากใบยาดำ (sisal) และเส้นใยจากใบเฮเนควอน (henequen) เป็นต้น

(2) เส้นใยจากขนของเมล็ด (Seed-hair Fibers) เส้นใยกลุ่มนี้ได้จาก ขนของเมล็ด และ ขนในฝักของเมล็ด (seed pods) ของพืช เส้นใยเหล่านี้จะสั้น ตัวอย่างได้แก่ เส้นใยฝ้าย และเส้นใยมะพร้าว เป็นต้น

(3) เส้นใยจากเปลือกไม้ (Bast-Fibers) เส้นใยกลุ่มนี้ได้จาก bast tissue หรือเปลือกของลำต้นของพืช ตัวอย่างเช่น ลินิน ป่าน (hemp) และปอกระเจา (jute) เป็นต้น

(4) เส้นใยจากส่วนประกอบอื่น ๆ (Miscellaneous) เส้นใยกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายฟาง (strawlike) เหมือนไม้ (woody) และหยาบ ส่วนใหญ่ได้จากส่วนที่เป็นฝักหรือก้านของใบ ตัวอย่างได้แก่ pissava, crin vegetal และ broom root เป็นต้น

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอกล่าวถึงเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เส้นใยฝ้าย และเส้นใยมะพร้าว พอสังเขป ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้จากขนของเมล็ด โดยฝ้ายมีอยู่หลายพันธุ์ด้วยกัน แบ่งเป็นชนิดย่อยๆ ตามท้องถิ่นที่ปลูก รูปร่างของใยฝ้ายแตกต่างจากใยชนิดอื่นๆ มีเซลล์เพียงเซลล์เดียว รูปทรงกรวยปลายแหลม ยาว 1.2-5.0 เซนติเมตร แบนเหมือนริบบิ้น หึ่งงอกกลับไปมา ไม่มีระเบียบ มีโพรงตรงกลาง ตอนปลายมักทึบ ใยจะมีความนุ่มและมีความมัน ส่วนประกอบทางเคมีของฝ้ายแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของใยฝ้าย [13]

| เส้นใย          | ปริมาณร้อยละต่อน้ำหนักแห้งของเส้นใย |
|-----------------|-------------------------------------|
| เซลลูโลส        | 88 - 96                             |
| โปรตีน          | 1.1 - 1.9                           |
| สารประกอบเปกติน | 0.7 - 1.2                           |
| เถ้า (ash)      | 0.7 - 1.6                           |
| ขี้ผึ้ง         | 0.4 - 1.0                           |
| น้ำตาล          | 0.3                                 |
| สี              | ปริมาณน้อยมาก                       |
| อื่น ๆ          | 0.9                                 |

ใยฝ้ายดิบมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 88-96 ของน้ำหนักเส้นใย ปริมาณโปรตีนในฝ้ายไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับพันธุ์ฝ้าย และที่ผิวเส้นใยฝ้ายจะมีขี้ผึ้งเคลือบอยู่ภายนอก

ความทนแรงดึงของเส้นใยฝ้ายจะอยู่ระหว่างขนสัตว์และไหม ใยแต่ละเส้นจะรับน้ำหนักได้ไม่เท่ากัน ความทนแรงดึงจะไม่ขึ้นกับขนาดของใยแต่จะขึ้นกับระดับการตกผลึก การเรียงตัวของผลึก และความชื้นในตัวเส้นใย

### 2.3.2 เส้นใยมะพร้าว

ใยมะพร้าวเป็นใยจากเมล็ด ได้จากเปลือกชั้นในที่หุ้มผลมะพร้าว ใยมีลักษณะหยาบ ส่วนใหญ่ใช้ทำเชือก ผ้าเนื้อหยาบ ขนแปรงและแผ่นใยอัดสำหรับปูรองพรม ทำเบาะเครื่องเรือนและที่นอน ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว [14]

| ส่วนประกอบของเส้นใย                              | ความเจริญของเส้นใย (maturity)<br>(ร้อยละต่อน้ำหนักแห้งของเส้นใย) |                 |                    |
|--|--|-----------------|--------------------|
|  | อ่อน (very young)  | ปานกลาง (young) | โตเต็มที่ (mature) |
| อินทรีย์สาร (organic matter)                     |  |                 | 98.8               |
| อนินทรีย์สาร (inorganic matter) หรือ             |  |                 | 1.2                |
| สารที่ละลายน้ำได้ (water-soluble substances)     | 15.5   | 1.6             | 5.2                |
| เปกติน (pectin)                                  | 4  | 2.7             | 3                  |
| เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)                     | 0.25   | 0.15            | 0.25               |
| สารที่ไม่ละลายในน้ำ (water-insoluble substances) | 84.5   | 84              | 94.8               |
| ลิกนิน (lignin)                                  | 41   | 40.5            | 45.8               |
| เซลลูโลส (cellulose)                             | 36.1   | 32.9            | 43.4               |
| แร่ธาตุ (mineral elements)                       |  |                 |                    |
| โปแตสเซียม (K)                                   |  |                 | 0.02               |
| ฟอสฟอรัส (P)                                     |  |                 | 0.01               |
| แคลเซียม (Ca)                                    |  |                 | 0.06               |
| แมกนีเซียม (Mg)                                  |  |                 | 0.04               |
| ไนโตรเจน (N)                                     |  |                 | 0.35               |
| โปรตีน   |  |                 | 2.2                |

## 2.4 จุดประสงค์งานวิจัย

ในงานวิจัยด้านพลาสติกได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติ มาใส่ในพลาสติกเพื่อเสริมแรงและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

Barton L. และ Mohammed F. [15] ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบ (composite) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุโครงสร้าง (structural components) โดยเตรียมจากพลาสติกใช้แล้วพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และเส้นใยจากพืชได้แก่ ฟางจากต้นโอ๊ต (oat straw) ฟางจากถั่วเหลือง (soy bean straw) และซังข้าวโพด (corn stalk fiber) โดยเน้นการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้กับปริมาณของเส้นใยที่ใช้ (ที่ความยาวเส้นใย 0.5 นิ้ว) ผลการวิจัยพบว่าความทนแรงกระแทก (impact strength) ความแข็ง (hardness) และความทนต่อการโค้งงอ (flexural strength) ของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 30% และคาดว่าวัสดุที่เตรียมได้จะสามารถผลิตได้ในรูปแผ่นและนำไปใช้ทดแทนวัสดุจำพวกไม้ได้



Kuruvilla Joseph, Sabu Thomas, C. Pavitharn และ M. Bramakumar [16] ได้ศึกษาการนำเส้นใยจากต้นยาดำ (sisal fiber) มาใช้เสริมแรงในพอลิเอทิลีน โดยศึกษาถึงผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยต่อความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีน ผลการวิจัยพบว่าความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นและดีที่สุดที่ความยาวของเส้นใยเท่ากับ 6 มม.

Hsin-Lung Chen และ Roger S. Porter [17] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยจากต้นปอกระเจา (kenaf) ในการเสริมแรงพอลิเอทิลีนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและศึกษาถึงผลของเส้นใยต่อปริมาณผลึก (crystallization) ของพอลิเอทิลีน ผลการวิจัยพบว่าเส้นใยดังกล่าวสามารถปรับปรุงความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีน โดยความทนแรงดึงจะขึ้นกับปริมาณเส้นใย นอกจากนี้พบว่าเส้นใยปอกระเจาไม่มีผลต่อปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีน

Jayamol George, S. S. Bhagawan, N. Prabhakaran และ Sabu Thomas [18] ได้ศึกษาการนำเส้นใยสับปะรดมาเสริมแรงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยศึกษาอิทธิพลของความยาวและปริมาณเส้นใยที่ใช้ พบว่าปริมาณเส้นใยเท่ากับ 30 % และความยาวของเส้นใยเท่ากับ 6 มม. จะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยฝ้ายดิบ และเส้นใยมะพร้าว มาใช้เสริมแรงในโพลิพลาสติกที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากเส้นใยฝ้ายดิบเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ และเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ ถ้าเป็นไปได้ก็จะเป็นการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เป็นประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหล่านี้อีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE 1807F) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด มีสมบัติตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE 1807F)

| Physical Properties                             | Value | Standard Method |
|---|-------|-----------------|
| Melt Flow Rate (g/10 min)                       | 7.0   | ASTM D1238      |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )                    | 0.918 | ASTM D1505      |
| Tensile Strength at Break (kg/cm <sup>3</sup> ) | 95    | ASTM D638       |
| Elongation at Break (%)                         | 110   | ASTM D638       |
| Elmendorf Tear Strength (g/25 micron)           | 500   | ASTM D1922      |
| Flexural Modulus (kg/cm <sup>3</sup> )          | 1400  | ASTM D790       |
| Hardness/Shore D                                | 48    | ASTM D2240      |
| Melting Point (°C)                              | 106   | ASTM D2117      |
| Vicat Softening Point (°C)                      | 85    | ASTM D1525      |

2. สารประกอบเอไซด์คาร์บอนาไมด์ (ADC) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยนามพลาสติก จำกัด (มหาชน)

3. สารประกอบซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ของบริษัท ฟลูกา (Fluka) จำกัด

4. สารประกอบไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ของบริษัท ฟลูกา จำกัด

5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

6. เส้นใยฝ้ายดิบ

7. เส้นใยมะพร้าว

8. เอทานอล

9. น้ำกลั่น

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบ มีดังนี้

|  | แบบ/รุ่น       | ผู้ผลิต              |
|--|----------------|----------------------|
| 1. Two-Roll Mill (รูปที่ 3.1)                                  | LRM 150        | Lab Tech Engineering |
| 2. อุปกรณ์ช่วยในการผสมสำหรับเครื่อง Two-Roll Mill (รูปที่ 3.2) |                |                      |
| 3. Compression Moulding Machine (รูปที่ 3.3)                   | -              | -                    |
| 4. Scanning Electron Microscopy (SEM)                          | JSM-5410LV     | JEOL                 |
| 5. Universal Testing Machine                                   | L500           | LLOYD                |
| 6. อุปกรณ์ทดสอบ Compression Set (รูปที่ 3.4)                   | -              | -                    |
| 7. อุปกรณ์ทดสอบ Compression Creep (รูปที่ 3.5)                 | -              | -                    |
| 8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester)                         | IOII/Series IX | Instron              |
| 9. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Veniier Caliper)                        | -              | XILIANG              |



รูปที่ 3.1 เครื่อง Two-Roll Mill LRM150 LAB TECH ENGINEERING

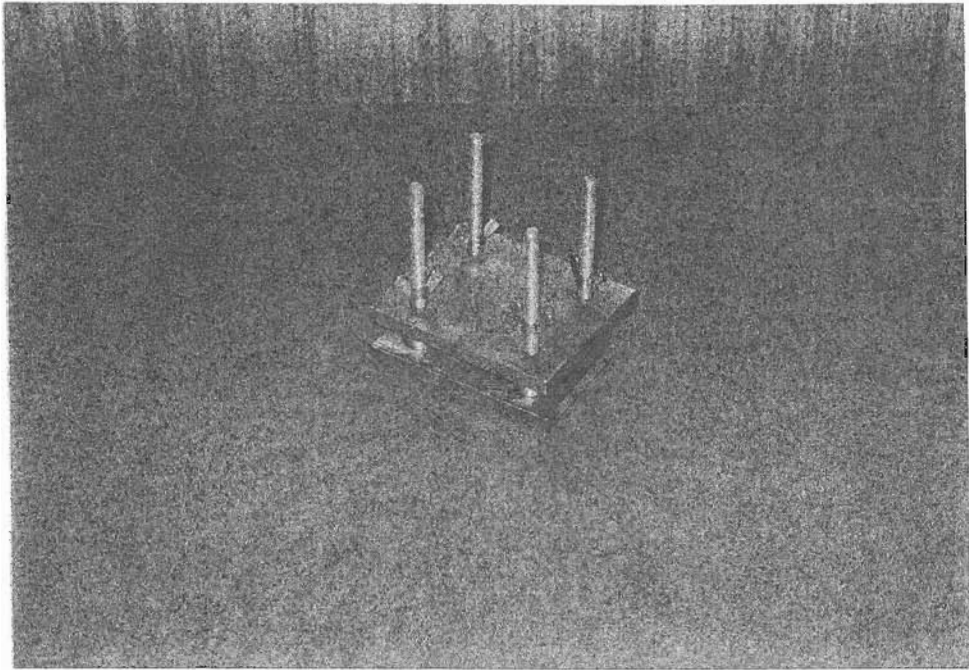




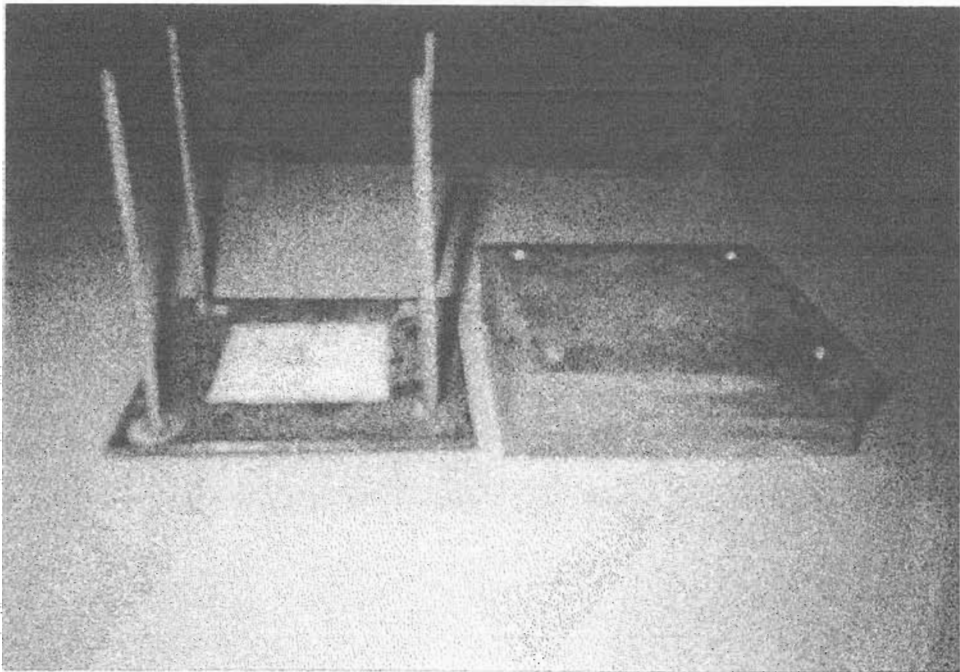
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ช่วยในการผสมสำหรับเครื่อง Two-Roll Mill



รูปที่ 3.3 เครื่อง Compression Moulding



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ทดสอบ Compression Set



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบ Compression Creep

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมพลาสติก

1. เตรียมสารตั้งต้น ดังสูตร

เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

สารประกอบเอโซไดคาร์บอไมด์ (ADC) 8 phr (part per hundred resin)

สารประกอบซิงก์ออกไซด์ (ZnO) 0.4 phr

สารประกอบไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) 0.25 phr

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 100 กรัมต่อการผสมด้วยเครื่อง Two-Roll Mill 1 ครั้ง

2. ตั้งอุณหภูมิเครื่อง Two-Roll Mill โดยตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งลูกหน้าและลูกกลิ้งลูกหลังเท่ากับ 115 และ 105 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความเร็วรอบลูกกลิ้งลูกหน้าและลูกกลิ้งลูกหลังเท่ากับ 20 และ 24 รอบต่อนาทีตามลำดับ และปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับการบดส่วนผสม [19]

3. นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนมาบดด้วยเครื่อง Two-Roll Mill จนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงใส่สารฟู (ADC) ลงไป ให้อุปกรณ์ช่วยในการผสมตัดเนื้อพลาสติกพันกันไปมาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของสารฟูในเนื้อพลาสติกเป็นเวลาประมาณ 5 – 7 นาทีจนสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงใส่สารช่วยฟู (ZnO) ลงไป ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5 นาที แล้วจึงเติมสารเชื่อมขวาง (DCP) ลงไป ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยวิธีดังที่กล่าวมาแล้ว โดยใช้เวลาประมาณ 3 – 5 นาที จากนั้นจึงนำส่วนผสมออกจากเครื่อง Two-Roll Mill ในลักษณะแผ่น

4. นำแผ่นส่วนผสมที่ได้ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5$  % เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปต่อไป



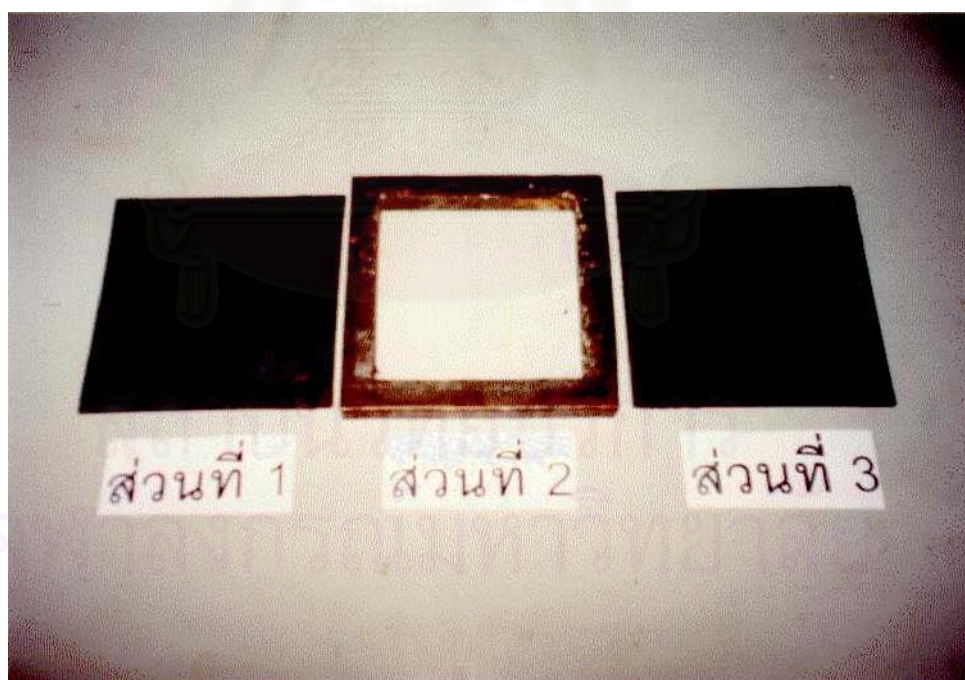
### 3.3.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1. การขึ้นรูปใช้เครื่อง Compression Moulding และแม่แบบที่ใช้ทำจากเหล็ก ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 คือ ส่วนที่ 1 และ 3 มีขนาด 20 ซม. X 20 ซม. X 0.5 ซม. และส่วนที่ 2 ขนาด 20 ซม. X 20 ซม. X 1.5 ซม. และเจาะเป็นช่องตรงกลางขนาด 18 ซม. X 18 ซม. X 1.5 ซม.

2. นำแม่แบบไปให้ความร้อนก่อนขึ้นรูปเป็นเวลา 10 นาที นำแผ่นส่วนผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้มีน้ำหนักประมาณ 28 กรัม แล้วใส่ในแม่แบบ ปิดส่วนบน กดแม่แบบด้วยแรงดันเท่ากับ 5 กิโลพาสคาล ที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

3. ปิดเครื่องให้ความร้อน ทิ้งให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 40 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดัน 5 กิโลพาสคาล จากนั้นลดความดันแล้วจึงนำแผ่นโฟมพลาสติกที่เตรียมได้ออกจากแม่แบบ

4. นำแผ่นโฟมพลาสติกที่เตรียมได้จากข้อ 7 ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5$  % เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบ



รูปที่ 3.6 แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมพลาสติก

### 3.3.3 การเตรียมโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

1. เตรียมสารเคมีตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3.2 โดยเส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ ได้แก่ เส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว นอกจากนี้ยังใช้ผงเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณ 3 % เพื่อเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับเส้นใยเซลลูโลส โดยผงเส้นใยเซลลูโลสเตรียมได้จากการนำเส้นใยเซลลูโลสมาไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 250 มิลลิลิตรต่อเส้นใยเซลลูโลส 5 กรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น นำสารละลายที่ได้ไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปกรอง นำผงเส้นใยเซลลูโลสที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปคัดขนาดด้วย Mesh โดยผงเส้นใยฝ้ายดิบใช้ Mesh ขนาด 38 ไมครอน และเส้นใยมะพร้าวใช้ Mesh ขนาด 53 ไมครอน แล้วจึงนำไปใช้ในการเตรียมโพลีพลาสติกผสมผงเส้นใยเซลลูโลส

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการไฮโดรไลซ์ แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผงเส้นใยเซลลูโลส

ตารางที่ 3.2 สูตรที่ใช้ในการเตรียมโพลิเมอร์

| สูตร      | LDPE<br>(กรัม) | ADC<br>(กรัม) | ZnO<br>(กรัม) | DCP<br>(กรัม) | ชนิดเส้นใย/ปริมาณ<br>(%) |
|-----------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|
| LDPE/CT1  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | ฝ้าย/1%                  |
| LDPE/CT2  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | ฝ้าย/2%                  |
| LDPE/CT3  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | ฝ้าย/3%                  |
| LDPE/HCT3 | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | ผงเส้นใยฝ้าย/3%          |
| LDPE/CR1  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | มะพร้าว/1%               |
| LDPE/CR2  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | มะพร้าว/2%               |
| LDPE/CR3  | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | มะพร้าว/3%               |
| LDPE/HCR3 | 100            | 8             | 0.4           | 0.25          | ผงเส้นใยมะพร้าว/3%       |

2. นำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นก่อน โดยใช้สภาวะการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการเตรียมแผ่นส่วนผสมในหัวข้อ 3.3.1 โดยการผสมเส้นใยหรือผงเส้นใยเซลลูโลสจะอยู่ในลำดับสุดท้ายหลังจากผสมสารเชื่อมขวางแล้ว จากนั้นนำแผ่นส่วนผสมที่เตรียมได้ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5$  %

3. นำแผ่นส่วนผสมมาขึ้นรูปเป็นโพลิเมอร์โดยใช้สภาวะการขึ้นรูปเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2

### 3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

เส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. เส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว – วัดความยาวเส้นใยด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์และเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยเครื่อง SEM
2. ผงเส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว – วัดขนาดด้วยเครื่อง SEM

### 3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟม

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของโฟม

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3575 Suffix V-Method A [20] โดยวัดมวลและปริมาตรของชิ้นทดสอบ แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างด้วยสมการที่ 3.1

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $D$  = ความหนาแน่นของโฟมตัวอย่าง (กรัม/ลบ.ซม.)

$M$  = มวลของชิ้นทดสอบ (กรัม)

$V$  = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (ลบ.ซม.)

#### 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเซลล์

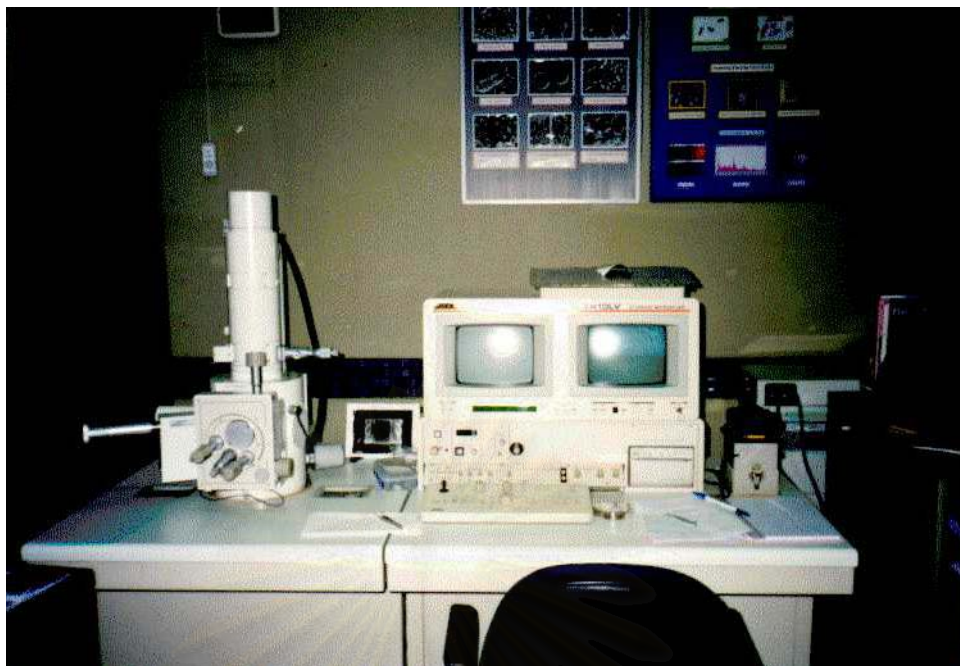
ด้วยเครื่อง SEM รุ่น JSM-5410LV ของ JEOL (รูปที่ 3.8) โดยใช้กระแสวิกซ์อิเล็กตรอน (electron beam) 1.5 กิโลโวลต์ และกำลังขยาย 15 เท่า เตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาดประมาณ 10 มม. x 10 มม. x 2 มม. โดยเลือกตัดผิวด้านบนบริเวณตรงกลางของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบไปติดบนแท่นทรงกลม (stub) ด้วยเทปกาว แล้วจึงนำไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Browser S-150-HB ในบรรยากาศอาร์กอน ภายใต้ความดันสุญญากาศ 0.3 บาร์ จากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM ต่อไป

การคำนวณปริมาณเซลล์แบบเปิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาณเซลล์แบบเปิด(\%)} = \frac{\text{จำนวนเซลล์แบบเปิดที่นับได้จากภาพ}}{\text{จำนวนเซลล์ทั้งหมดที่นับได้จากภาพ}} \times 100 \quad (3.2)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.8 เครื่อง SEM รุ่น JSM 5410LV ของ JEOL

### 3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

#### 3.6.1 การทดสอบการคืบ (Compression Creep)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3575 Suffix BB[20] ด้วยอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้น้ำหนักทดสอบขนาด 5 กก. 10 กก. และ 15 กก. โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 มม. x 50 มม. และมีความหนา 25 มม. (ถ้าความหนาของชิ้นทดสอบมีความหนาไม่ถึง 25 มม. อนุโลมให้นำชิ้นทดสอบมาซ้อนกันได้ โดยห้ามใช้วัสดุที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกัน) สมบัติที่ทดสอบได้แก่ ค่า % Compression Creep ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\% \text{ Compression Creep} = \frac{(t_i - t_d)}{t_i} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ % Compression Creep = ความสามารถในการคืบของโพลิพลาสติก

$t_i$  = ความหนาของชิ้นทดสอบที่วัด (มม.) หลังจากให้น้ำหนักเป็นเวลา  $60 \pm 5$  วินาที

$t_d$  = ความหนาของโพลิตัวอย่าง (มม.) ภายใต้น้ำหนักและระยะเวลาที่กำหนด ได้แก่

6 นาที 1 ชม. 24 ชม. 48 ชม. 72 ชม. 96 ชม. 120 ชม. 144 ชม. และ 168 ชม.

### 3.6.2 การทดสอบความสามารถในการคืบตัว (Compression Set)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3575 Suffix B [20] ด้วยอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 50 มม. x 50 มม. x 25 มม. (ถ้าความหนาของชิ้นทดสอบมีความหนาไม่ถึง 25 มม. อนุโลมให้นำชิ้นทดสอบมาซ้อนกันได้โดยห้ามใช้วัสดุที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกัน) กดชิ้นทดสอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบให้มีความหนาประมาณ 50% ของความหนาของชิ้นทดสอบ กดไว้เป็นเวลา 22 ชม. แล้วนำออกจากอุปกรณ์ทดสอบ วัดความหนาของชิ้นทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด สมบัติที่ทดสอบได้แก่ค่า %Compression Set ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\% \text{ Compression Set (Cd)} = \frac{(t_o - t_f)}{t_o} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ Cd = ความสามารถในการคืบตัวของชิ้นทดสอบ (%)

$t_o$  = ความหนาของชิ้นทดสอบ (มม.)

$t_f$  = ความหนาของชิ้นทดสอบ (มม.) ตามระยะเวลาที่กำหนดได้แก่ 0 ชม. 1 ชม. 2 ชม. 3 ชม. 4 ชม. 5 ชม. 8 ชม. 10 ชม. 15 ชม. 23 ชม. และ 24 ชม.

### 3.6.3 การทดสอบความทนแรงกด (Compressive test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3575 Suffix D [20] ด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine แบบ L500 ของ Lloyd (รูปที่ 3.9) ใช้ Load Cell ขนาด 500 นิวตัน ตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 มม. x 50 มม. และมีความหนา 25 มม. (ถ้าความหนาของชิ้นทดสอบมีขนาดไม่ถึง 25 มม. อนุโลมให้นำชิ้นทดสอบมาซ้อนกันได้โดยห้ามใช้วัสดุที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกัน) อัตราเร็วในการกด 12.5 มม./นาที โดยกดชิ้นทดสอบลงไป 25% ของความหนาชิ้นทดสอบ สมบัติที่ทดสอบได้แก่ ค่า Compression deflection force per unit of specimen area ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$CD = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

เมื่อ CD = Compression deflection force per unit of specimen area

หรือ Compressive Stress (กิโลพาสคาล)

F = แรงที่ใช้กดชิ้นทดสอบลงไป 25% ของความหนาของชิ้นทดสอบ (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (ตารางเมตร)





รูปที่ 3.9 เครื่อง Universal Testing Machine แบบ L500 ของ LLOYD

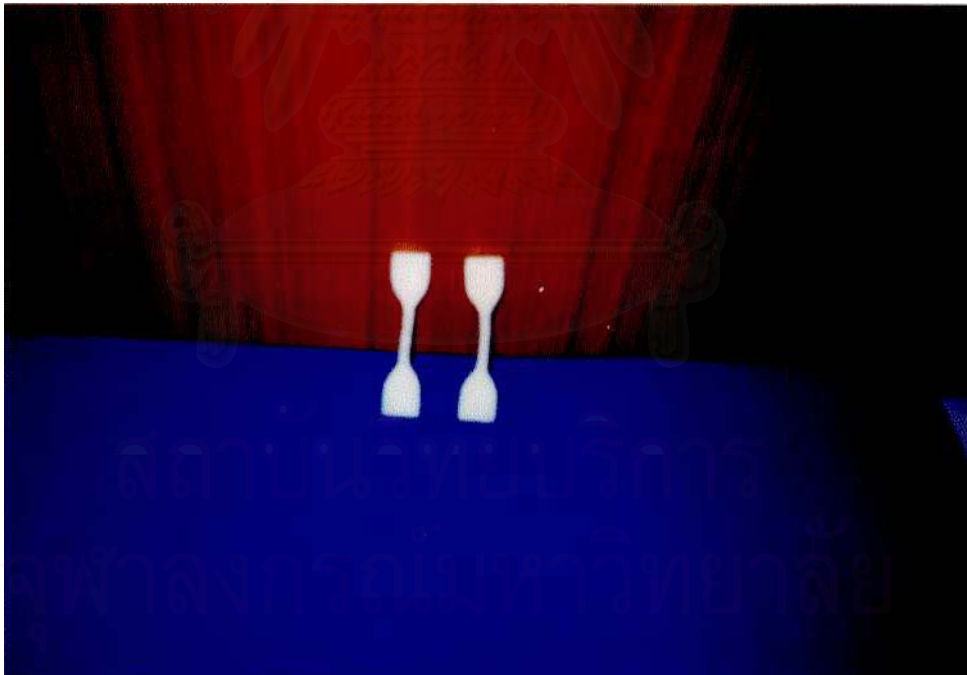
#### 3.6.4 การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412-98a Test Method A [21] ด้วยเครื่อง Instron Model IOII/Series IX (รูปที่ 3.10) โดยใช้ Load cell ขนาด 500 นิวตัน ตัดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน Standard dumbbell dies Dimension A (รูปที่ 3.11) อัตราเร็วในการดึง 500 มม./นาที โดยสมบัติที่ทดสอบได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) แบบ IOII/Series IX ของ Instron



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

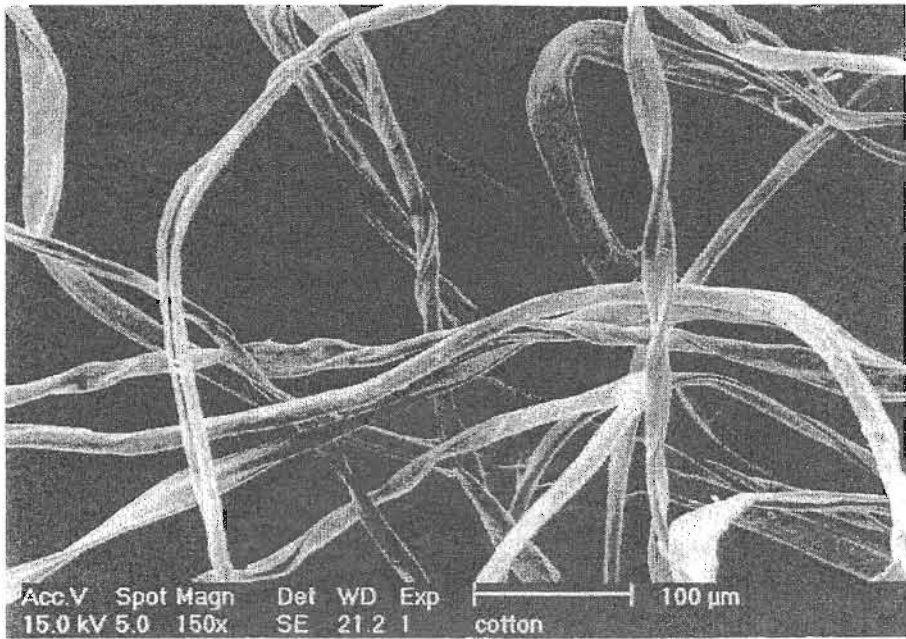
สมบัติทางกายภาพที่ทดสอบสำหรับเส้นใยฝ้ายดิบ เส้นใยมะพร้าว และผงของเส้นใยทั้งสองชนิดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ได้แก่ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยความยาวของเส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าววัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งสองชนิดวัดจากภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผงเส้นใยฝ้ายดิบและผงเส้นใยมะพร้าววัดจากภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสแสดงในตารางที่ 4.1

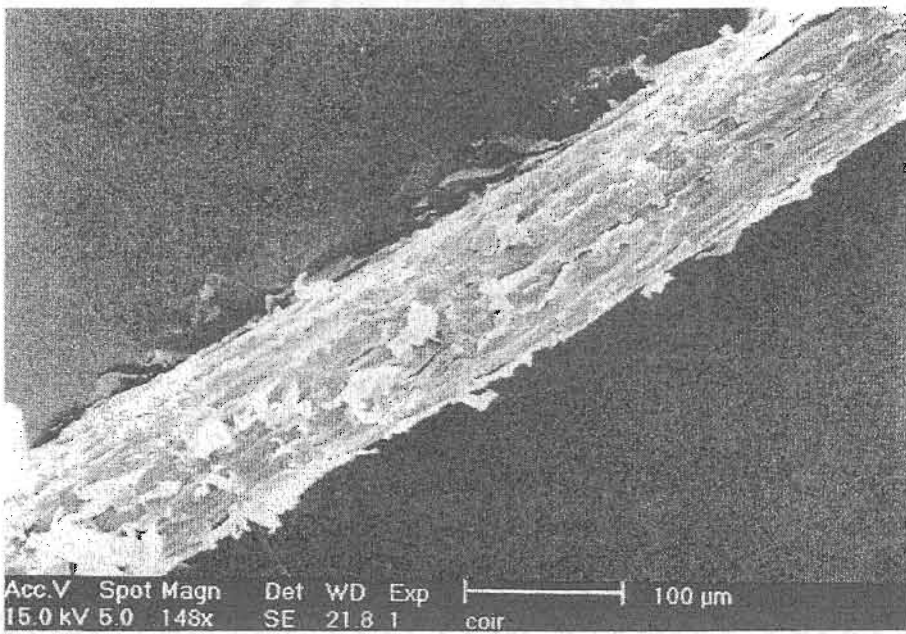
ตารางที่ 4.1 ขนาดของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

| ชนิดของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส | ความยาวเส้นใย<br>(มม.) | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>(มม.) |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| เส้นใยฝ้ายดิบ                    | 22 – 32                | 0.010 – 0.035                  |
| เส้นใยมะพร้าว                    | 100 – 200              | 0.115 – 0.24                   |
| ผงเส้นใยฝ้ายดิบ                  | 0.071 – 0.128          | 0.008 – 0.017                  |
| ผงเส้นใยมะพร้าว                  | 0.250 – 0.320          | 0.020 – 0.050                  |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

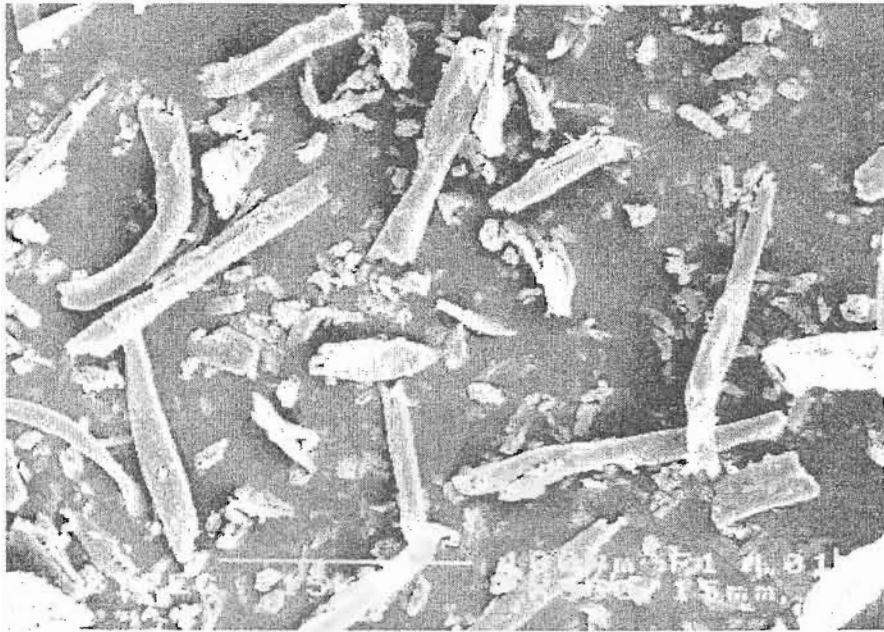


รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยฝ้ายดิบ

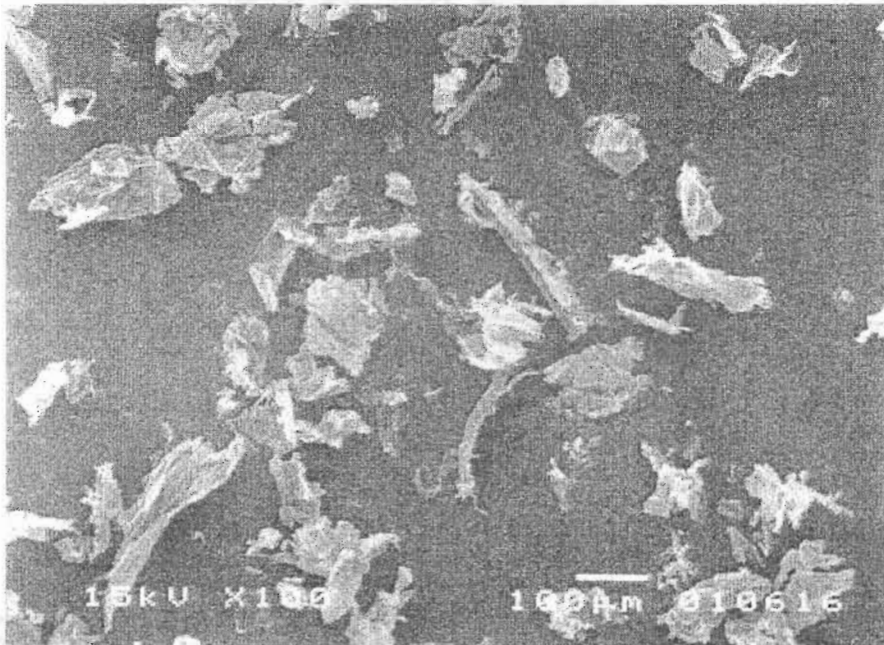


รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยมะพร้าว





รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยฝ้ายดิบ



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยมะพร้าว

## 4.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟม

### 4.2.1 ความหนาแน่นของโฟม

สมบัติเชิงกลของโฟมพลาสติกจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโฟมพลาสติก [1] กล่าวคือ ความแข็งแรงของโฟมพลาสติกจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของโฟมพลาสติก ค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่าง

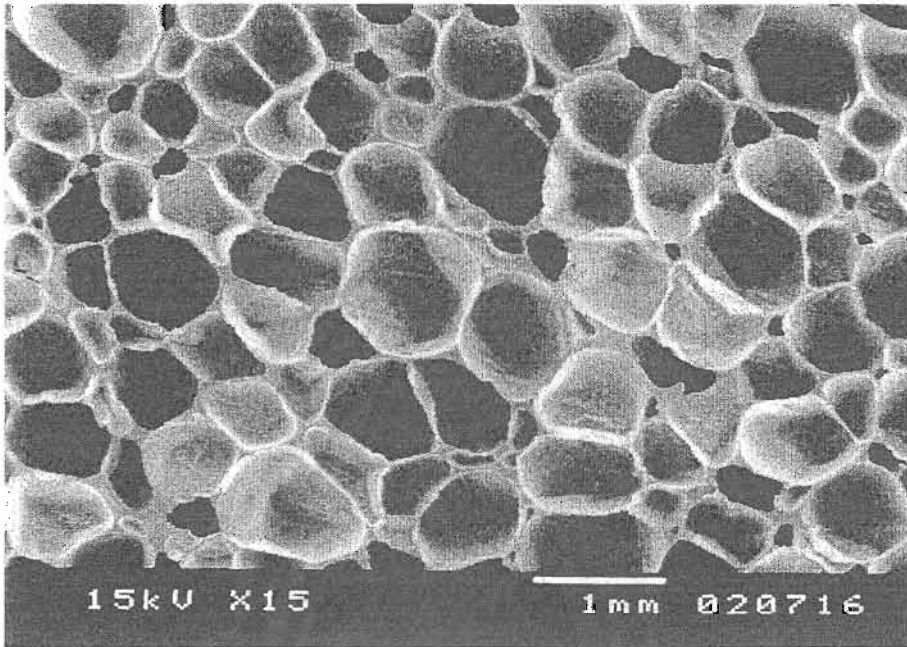
| ตัวอย่าง  | ความหนาแน่นของโฟม<br>(กรัม/ลบ. ซม.) | ความหนาแน่นของพอลิเมอร์<br>(กรัม/ลบ. ซม.) | ความหนาแน่น<br>สัมพัทธ์ |
|-----------|-------------------------------------|---|-------------------------|
| LDPE Foam | 0.0655                              | 0.918                                     | 0.0714                  |
| LDPE/CT1. | 0.0637                              | 0.918                                     | 0.0694                  |
| LDPE/CT2  | 0.0623                              | 0.918                                     | 0.0679                  |
| LDPE/CT3  | 0.0620                              | 0.918                                     | 0.0674                  |
| LDPE/HCT3 | 0.0604                              | 0.918                                     | 0.0658                  |
| LDPE/CR1  | 0.0645                              | 0.918                                     | 0.0703                  |
| LDPE/CR2  | 0.0634                              | 0.918                                     | 0.0691                  |
| LDPE/CR3  | 0.0621                              | 0.918                                     | 0.0676                  |
| LDPE/HCR3 | 0.0617                              | 0.918                                     | 0.0672                  |

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะมีการผสมด้วยเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ดังนั้นค่าความหนาแน่นของโฟมที่เตรียมได้จะไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล



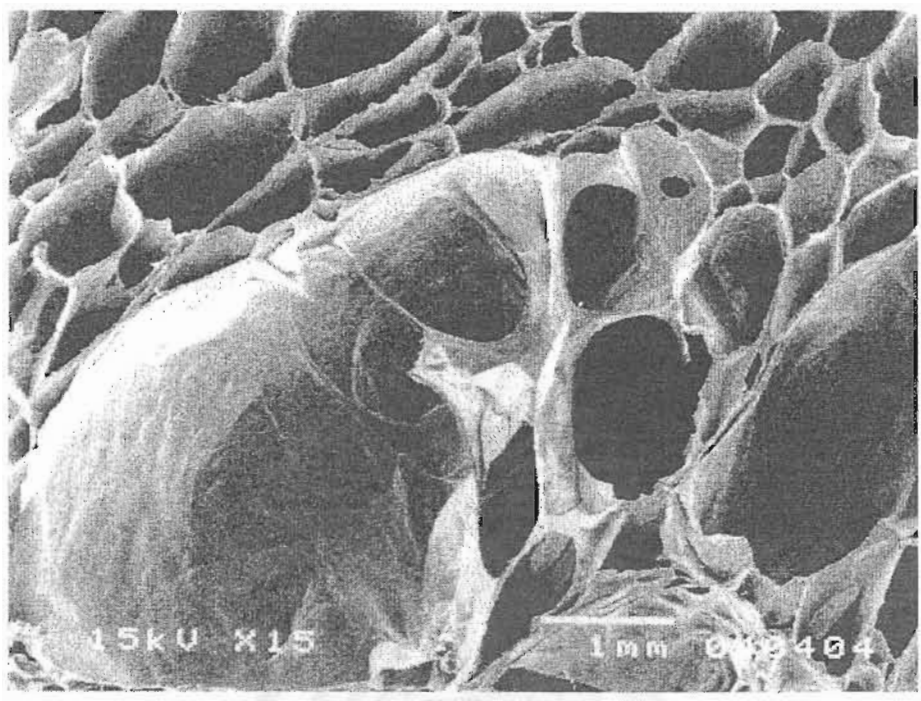
#### 4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเซลล์ของโฟม LDPE ด้วยเครื่อง SEM ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยพบว่า โฟม LDPE มีขนาดของเซลล์ค่อนข้างสม่ำเสมอ และเซลล์ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและเป็นเซลล์แบบปิด

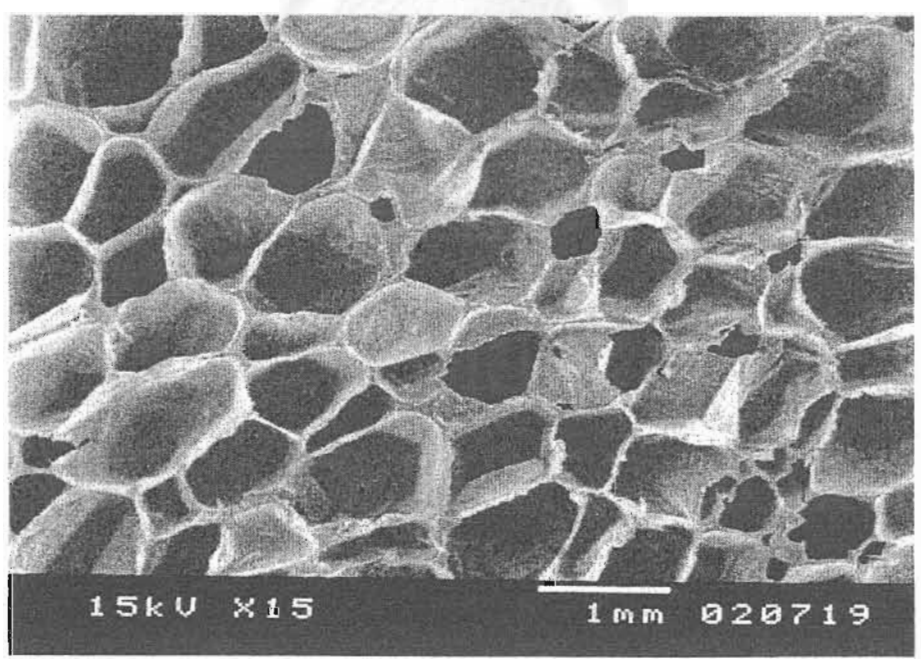


รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE

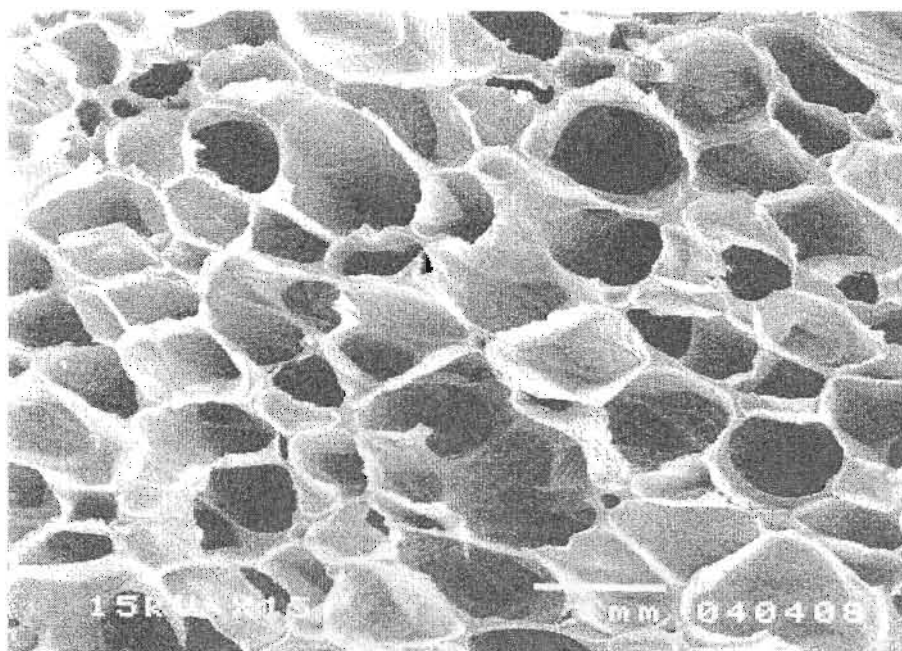
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ พบว่าเส้นใยฝ้ายจับตัวเป็นก้อนแยกเฟสกับเนื้อโฟม ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยฝ้ายดิบมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสูง [22] ทำให้เกิดการกระจายตัวไม่ดี ซึ่งการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยฝ้ายลักษณะนี้จะมีขนาดใหญ่และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยฝ้ายดิบในเนื้อพลาสติกเพิ่มขึ้น การจับตัวเป็นก้อนในลักษณะนี้จะส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของเซลล์และจำนวนเซลล์แบบเปิด กล่าวคือกลุ่มก้อนของเส้นใยฝ้ายดิบจะไปรบกวนกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบในอัตราส่วนต่าง ๆ กันแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.9 โดยพบว่าโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก มีรูปร่างเซลล์เป็นรูปวงรีและรูปหลายเหลี่ยม ส่วนโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก และโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก มีรูปร่างเซลล์เป็นรูปวงรี นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยฝ้ายดิบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จำนวนเซลล์แบบเปิดมากขึ้นและเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น



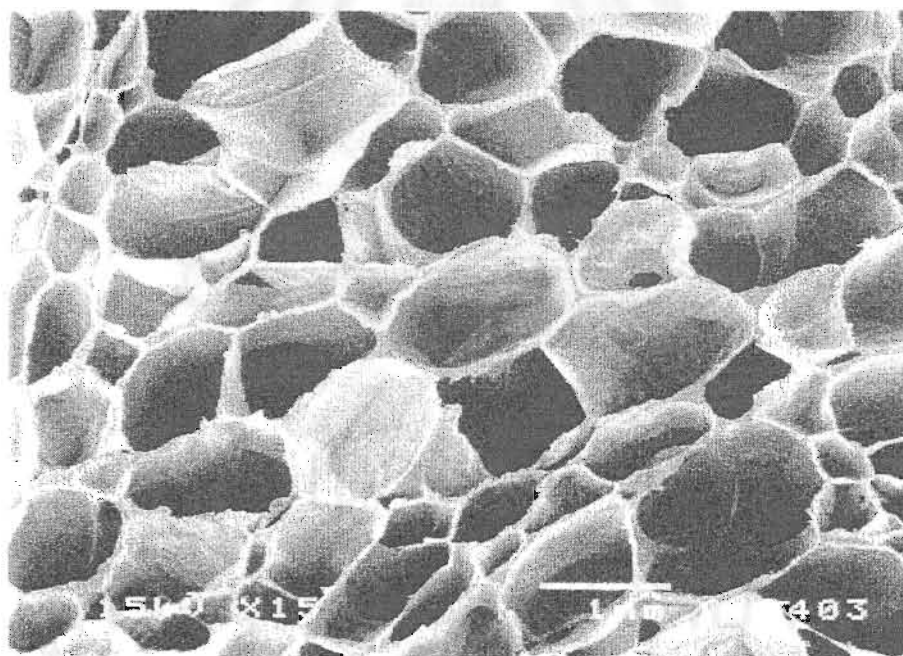
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของก้อนเส้นใยฝ้ายดิบในโฟมพลาสติก



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 1 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก



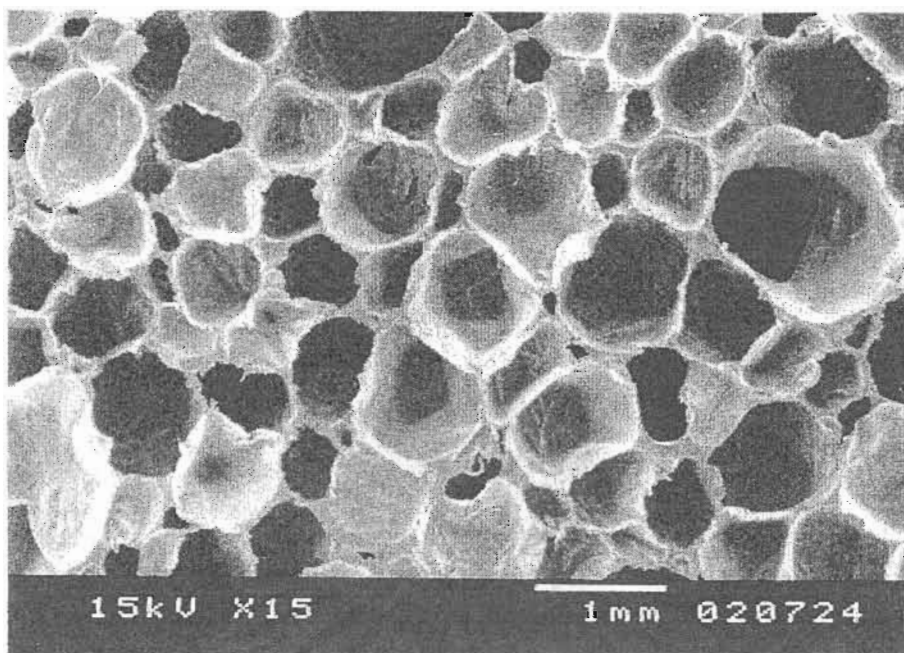
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

จากปัญหาการกระจายตัวของเส้นใยทั้งสองชนิดในเนื้อโพลีเอทิลีน ผู้วิจัยจึงพยายามแก้ปัญหานี้โดยการเตรียมเส้นใยทั้งสองชนิดในรูปของผงเพื่อใช้ผสมลงในโพลีเอทิลีน โดยปริมาณผงเส้นใยที่ใช้คือ 3% ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าโพลีเอทิลีน ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3 % โดยน้ำหนัก ผงเส้นใยฝ้ายดิบกระจายตัวได้ดีขึ้นในเนื้อโพลีเอทิลีน แต่ยังคงจัดตัวแยกเฟสกับเนื้อโพลีเอทิลีน ซึ่งเหมือนกับกรณีของผงเส้นใยมะพร้าวที่จัดตัวแยกเฟสกับเนื้อโพลีเอทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

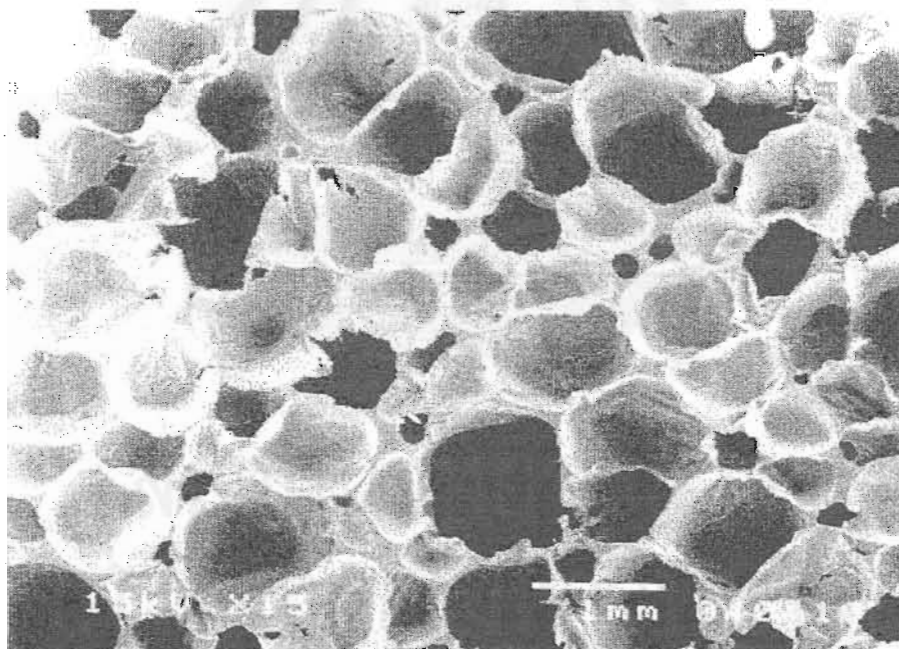


รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยฝ้ายดิบในโพลีเอทิลีน ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

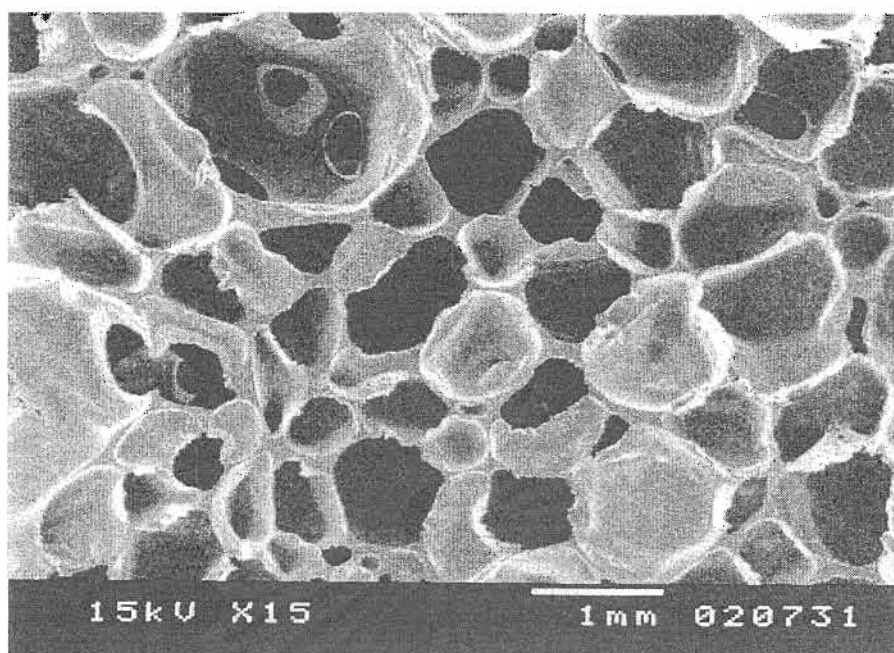
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 2 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ได้เส้นใยมะพร้าว 3 % โดยน้ำหนัก

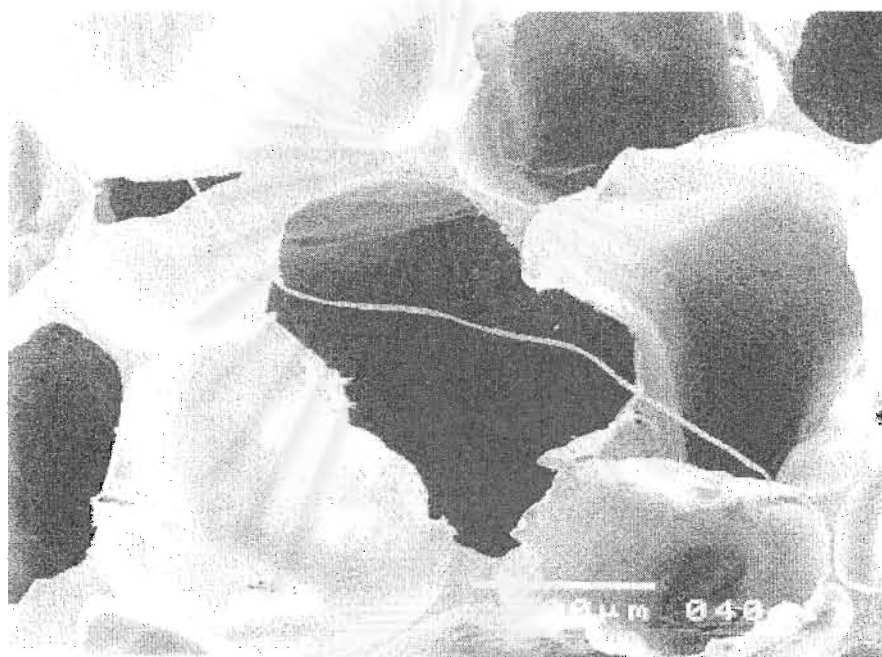
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของเซลล์และจำนวนเซลล์แบบเปิดระหว่างโฟมตัวอย่างที่ได้เส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว พบว่าที่อัตราส่วนเท่ากันโฟมตัวอย่างที่ได้เส้นใยมะพร้าวจะมีจำนวนเซลล์แบบเปิดน้อยกว่าและขนาดของเซลล์ที่เล็กกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างเซลล์ของโฟมตัวอย่าง

| ตัวอย่าง  | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>(มม.) | รูปร่างของเซลล์  | ปริมาณเซลล์<br>แบบเปิด(%) |
|-----------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
| LDPE Foam | $0.69 \pm 0.055$               | ทรงกลม           | $33.71 \pm 2.06$          |
| LDPE/CT1  | $0.84 \pm 0.012$               | วงรี/หลายเหลี่ยม | $51.16 \pm 2.57$          |
| LDPE/CT2  | $0.97 \pm 0.022$               | วงรี             | $59.32 \pm 3.05$          |
| LDPE/CT3  | $1.05 \pm 0.030$               | วงรี             | $62.82 \pm 4.03$          |
| LDPE/HCT3 | $1.18 \pm 0.041$               | วงรี             | $64.91 \pm 5.45$          |
| LDPE/CR1  | $0.75 \pm 0.015$               | วงรี/หลายเหลี่ยม | $46.38 \pm 2.42$          |
| LDPE/CR2  | $0.89 \pm 0.024$               | วงรี/หลายเหลี่ยม | $56.67 \pm 2.67$          |
| LDPE/CR3  | $1.01 \pm 0.035$               | วงรี/หลายเหลี่ยม | $62.12 \pm 3.70$          |
| LDPE/HCR3 | $1.12 \pm 0.049$               | วงรี/หลายเหลี่ยม | $62.50 \pm 5.28$          |

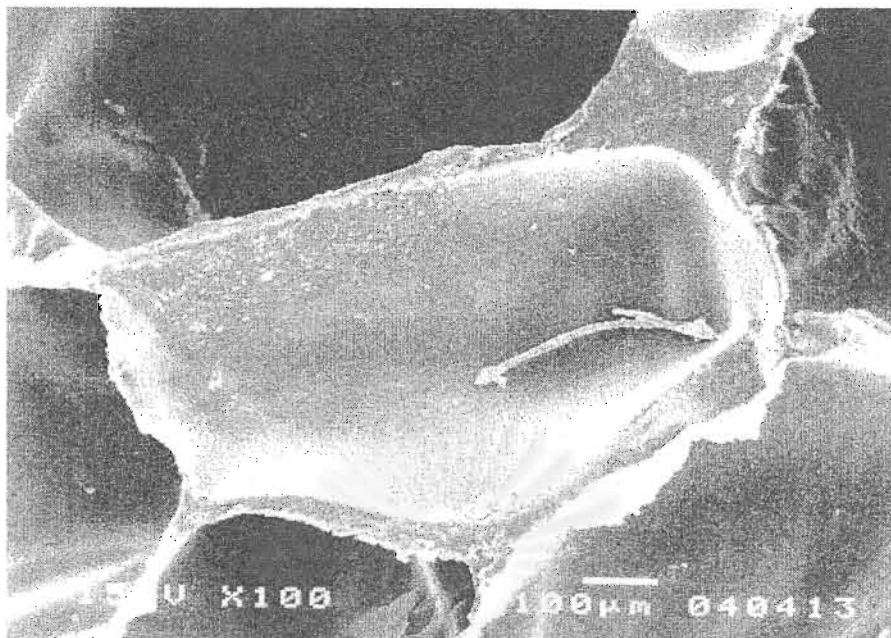


จากปัญหาการกระจายตัวของเส้นใยทั้งสองชนิดในเนื้อโพลีเอทิลีน ผู้วิจัยจึงพยายามแก้ปัญหาโดยการเตรียมเส้นใยทั้งสองชนิดในรูปของผงเพื่อใช้ผสมลงในโพลีเอทิลีน โดยปริมาณผงเส้นใยที่ใช้คือ 3% ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าโพลีเอทิลีน ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3 % โดยน้ำหนัก ผงเส้นใยฝ้ายดิบกระจายตัวได้ดีขึ้นในเนื้อโพลีเอทิลีน แต่ยังคงจัดตัวแยกเฟสกับเนื้อโพลีเอทิลีน ซึ่งเหมือนกับกรณีของผงเส้นใยมะพร้าวที่จัดตัวแยกเฟสกับเนื้อโพลีเอทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของผงเส้นใยฝ้ายดิบในโพลีเอทิลีน ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3 % โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

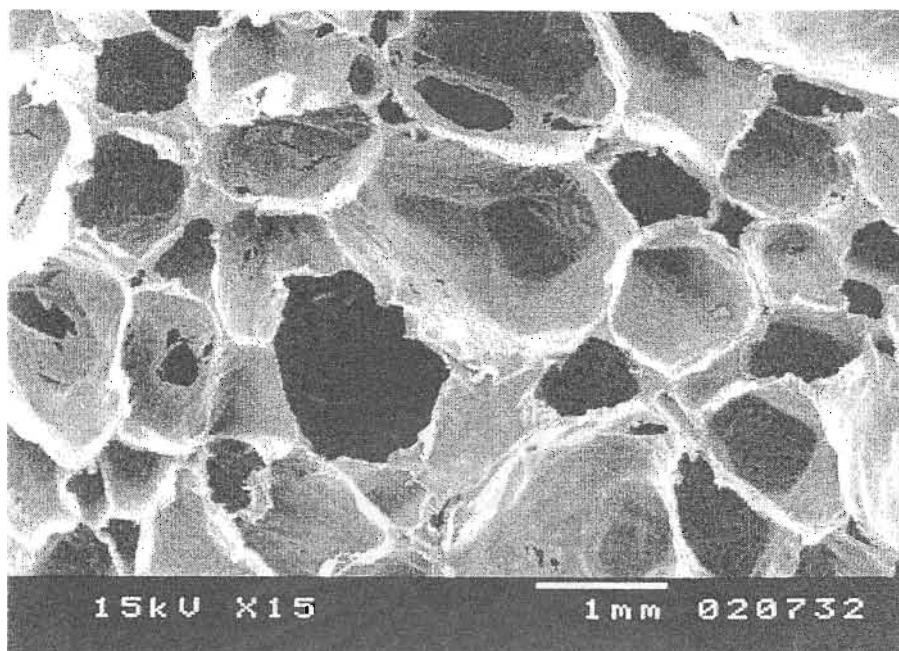


รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของผงดเส้นใยมะพร้าวในโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ใส่ผงดเส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

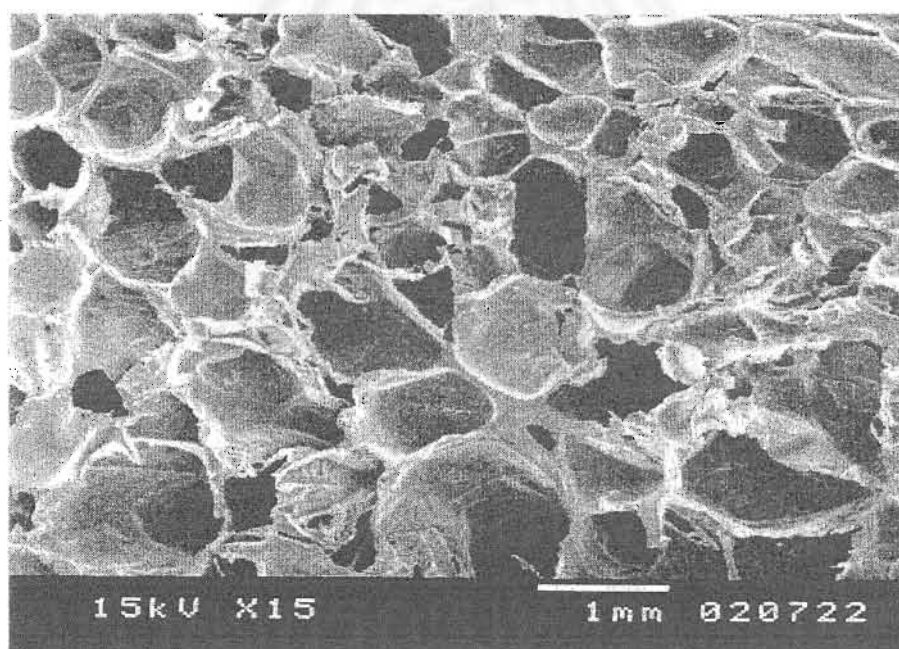
สำหรับโครงสร้างเซลล์ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พบว่าโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำประกอบด้วยเซลล์ส่วนใหญ่ที่มีรูปร่างเป็นรูปวงรี (รูปที่ 4.16) ในขณะที่โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีเซลล์ที่มีรูปร่างเป็นทั้งวงรี และรูปหลายเหลี่ยม (รูปที่ 4.17)

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเซลล์แบบเปิดและขนาดของเซลล์ในโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั้ง 2 ชนิด พบว่าโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและเซลล์มีขนาดใหญ่กว่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

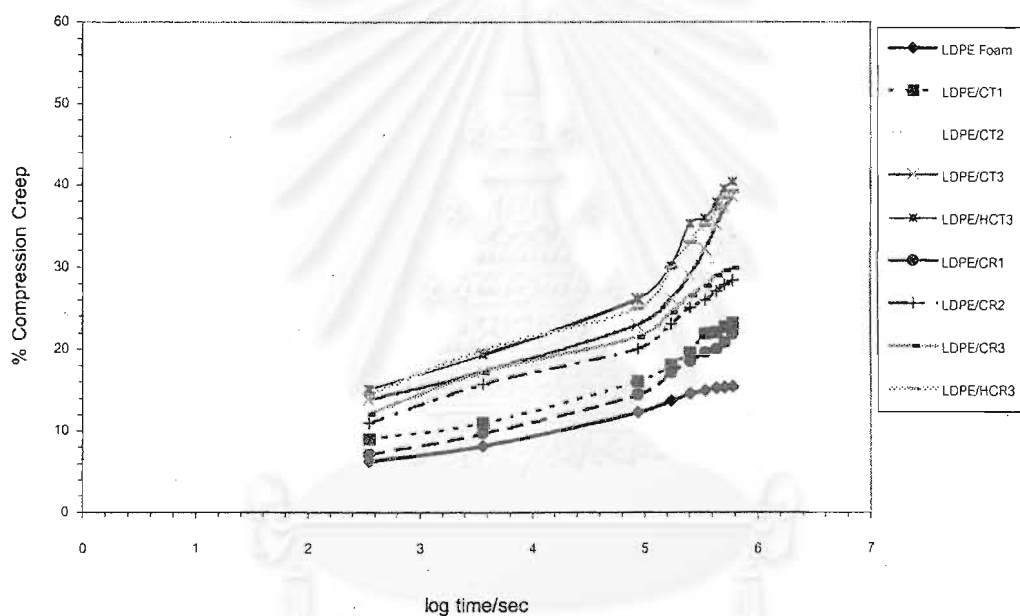


รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM ของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

### 4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมพลาสติก

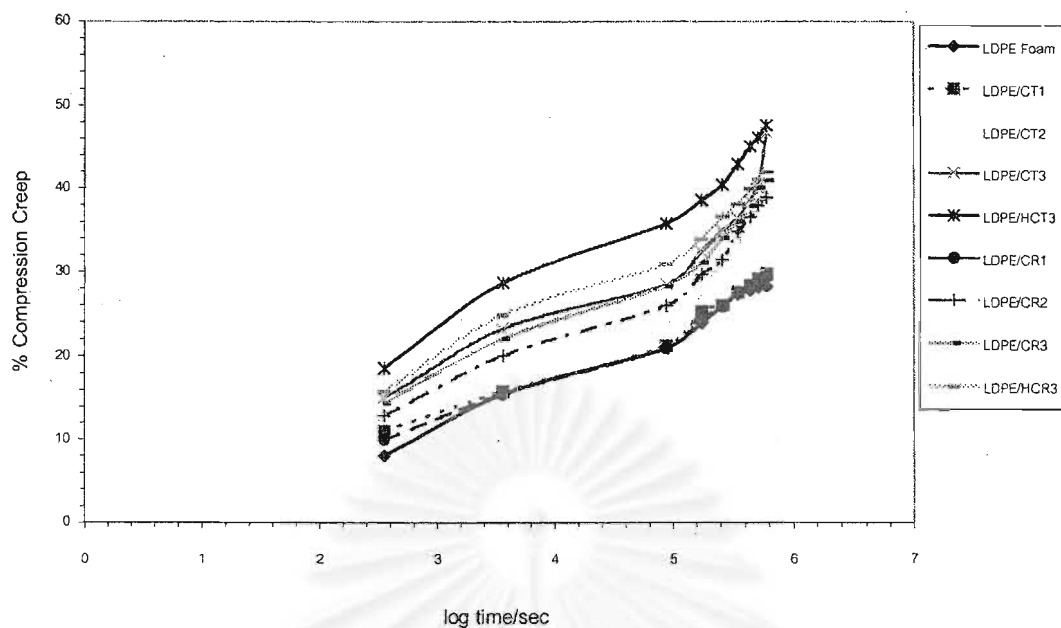
#### 4.3.1 การคืบ

การทดสอบการคืบเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นทดสอบภายใต้น้ำหนักคงที่ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด [24] สำหรับงานวิจัยนี้จะคำนวณค่า %การคืบ จากความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นทดสอบภายใต้น้ำหนักที่กำหนด 3 ค่า ได้แก่ 5 กก. 10 กก. และ 15 กก. พฤติกรรมการคืบของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสภายใต้น้ำหนักคงที่แต่ละค่า แสดงในรูปที่ 4.18 - 4.20

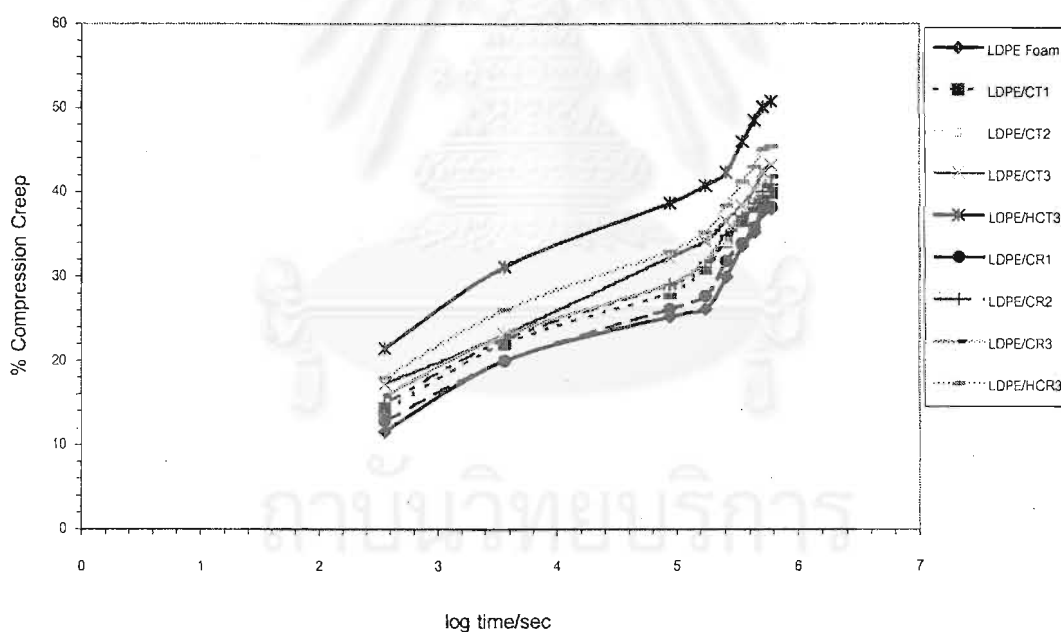


รูปที่ 4.18 พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำหนัก 5 กก.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำหนัก 10 กก.



รูปที่ 4.20 พฤติกรรมการคืบของโฟมพลาสติกแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำหนัก 15 กก.

จากรูปที่ 4.18 – 4.20 พบว่าโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสมีค่า %การคืบสูงกว่าโฟม LDPE ที่ไม่ได้ใส่เส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเป็นผลมาจากโฟม LDPE มีโครงสร้างที่เป็นเซลล์แบบปิดมากกว่า และขนาดของเซลล์เล็กกว่า ทำให้สามารถต้านทานน้ำหนักจากภายนอกได้ดีกว่า



นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีเมอร์ LDPE มีเซลล์ส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมทำให้รับน้ำหนักและกระจายแรงกระทำจากภายนอกได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณา interphase bonding พบว่าเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสที่ใส่ลงไปโพลีเมอร์พลาสติกจัดตัวแยกเฟสกับเฟสโพลีเมอร์ และไม่เกิด interphase bonding กับเฟสโพลีเมอร์ ทำให้เมื่อขณะที่โพลีเมอร์พลาสติกถูกกระทำจากแรงภายนอกจะไม่เกิดการถ่ายเทแรงจากเฟสโพลีเมอร์ไปยังเส้นใยหรือผงเส้นใยเซลลูโลส [25] ในขณะที่เดียวกันพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นค่า %การคืบ จะมีค่าสูงขึ้น (ทั้งในกรณีเส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว) และเมื่อเปรียบเทียบค่า %การคืบ ระหว่างโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยมะพร้าวจะมีค่า %การคืบ ที่ต่ำกว่าพฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และจำนวนเซลล์แบบเปิด กล่าวคือโพลีเมอร์พลาสติกที่มีจำนวนเซลล์แบบเปิดและขนาดของเซลล์เพิ่มมากขึ้นความสามารถในการรับน้ำหนักจะต่ำลง รวมถึงรูปร่างของเซลล์ โพลีเมอร์พลาสติกที่มีเซลล์รูปร่างทรงกลมจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักและกระจายแรงได้ดีกว่าเซลล์รูปร่างหลายเหลี่ยมและวงรีตามลำดับ [1] ซึ่งโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและเซลล์มีขนาดใหญ่กว่า และมีรูปร่างเซลล์เป็นรูปวงรี

สำหรับโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยเซลลูโลสจะมีค่า %การคืบ สูงกว่าโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลสทั้งในกรณีของเส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าว โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า %การคืบ ระหว่างโพลีเมอร์ที่ใส่ผงเส้นใยเซลลูโลสทั้งสองชนิด พบว่าโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว มีค่า %การคืบ ต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบมีรูปร่างเซลล์เป็นรูปวงรี ซึ่งต่างจากโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าวมีรูปร่างเซลล์ผสมระหว่างรูปวงรีและรูปหลายเหลี่ยม ทำให้มีความสามารถในการรองรับน้ำหนักที่ดีกว่า [1]

Mills และ Gilchrist [26] ได้ศึกษาพฤติกรรมการคืบและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ เพื่อให้ทำนายและอธิบายพฤติกรรมการคืบของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และในการทดลองได้ใช้สมการดังกล่าวคำนวณค่า %การคืบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

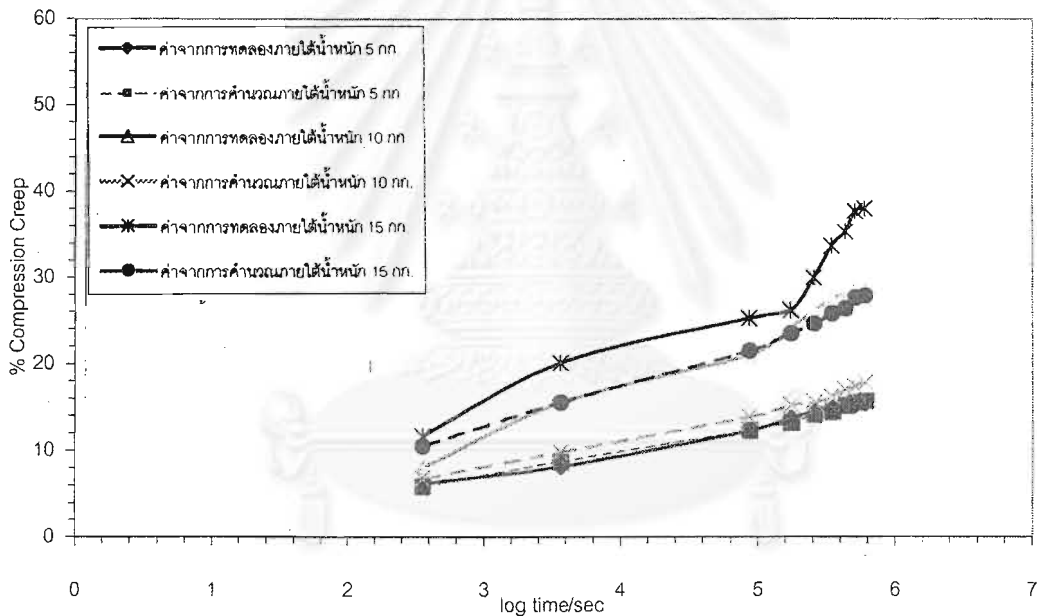
$$\varepsilon = \varepsilon_0 t_d^n \quad (4.1)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  = ค่าความเครียด (compressive strain)  
 $\varepsilon_0$  = ค่าความเครียดที่วัดหลังจาก  $t_d$  เป็นเวลา 1 วินาที  
 $t_d$  = ค่า compressive time  
 $n$  = ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \varepsilon$  และ  $\log$  time  
 (แสดงในตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ค่า n ที่ใช้ในสมการของ Mill และ Gilcrist

| ตัวอย่าง | LDPE Foam | LDPE/CT1 | LDPE/CT2 | LDPE/CT3 | LDPE/HCT3 | LDPE/CR1 | LDPE/CR2 | LDPE/CR3 | LDPE/HCR3 |
|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| ค่า n    | 0.1302    | 0.1366   | 0.146    | 0.1368   | 0.1367    | 0.1555   | 0.1276   | 0.1231   | 0.1359    |

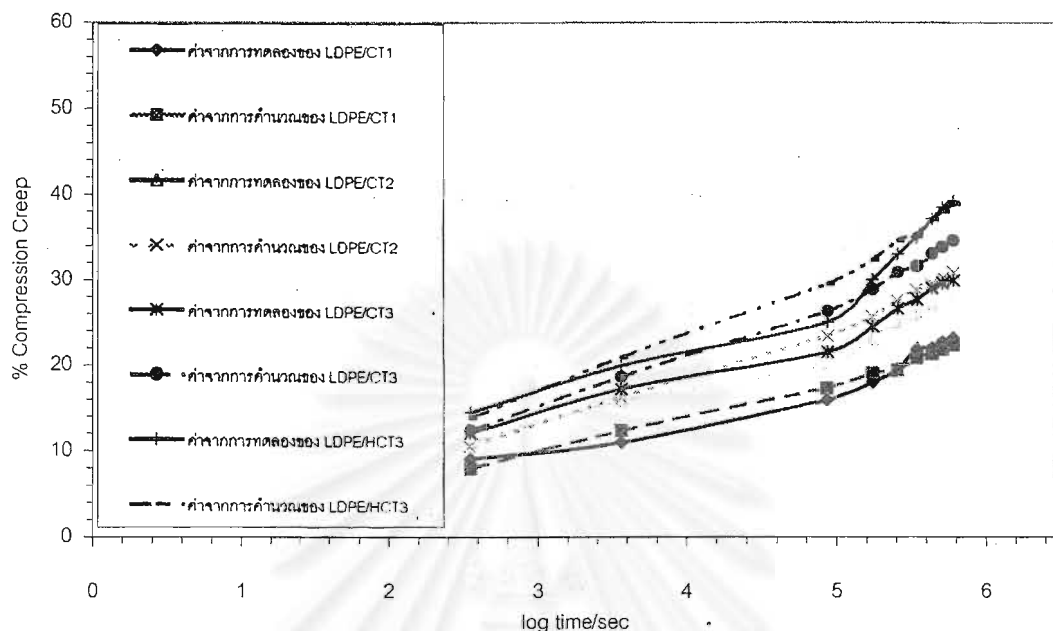
จากรูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ กับ log time ของ LDPE Foam ภายใต้น้ำหนัก 5 กก. 10 กก. และ 15 กก. ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณด้วยสมการของ Mills และ Gilcrist พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่เชื่อถือได้



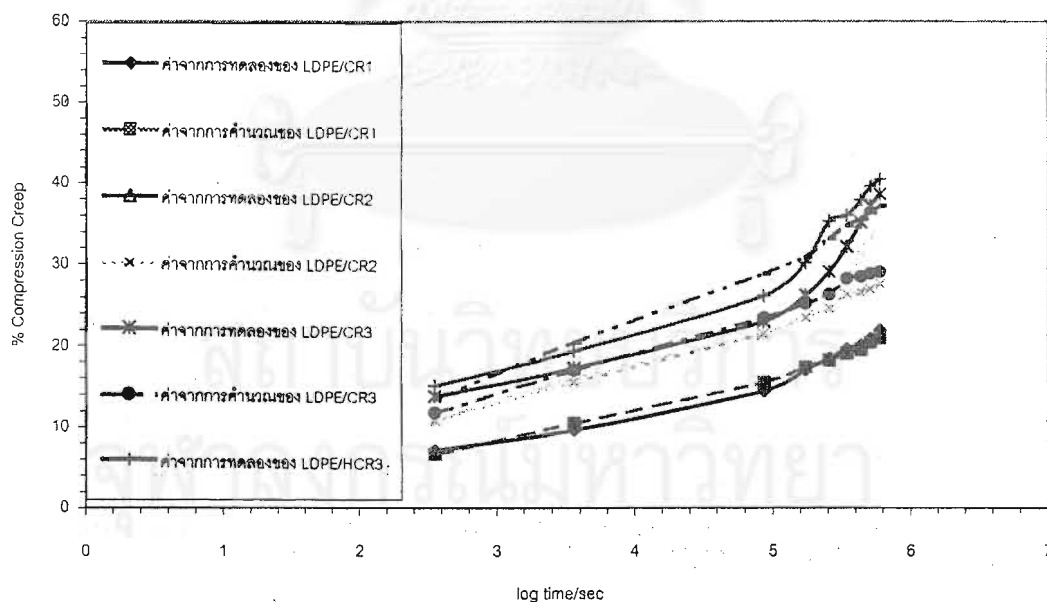
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของ LDPE Foam จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ

นอกจากนี้ได้ใช้สมการของ Mill และ Gilcrist คำนวณค่า %การคืบ ของ โฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนักต่าง ๆ กัน รูปที่ 4.22 - 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ กับค่า Compressive Strain ที่ได้จากการทดลองภายใต้น้ำหนัก 5 กก. 10 กก. และ 15 กก. ของโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Mill และ Gilcrist (ค่า n แสดงในตารางที่ 4.4) พบว่าค่าที่

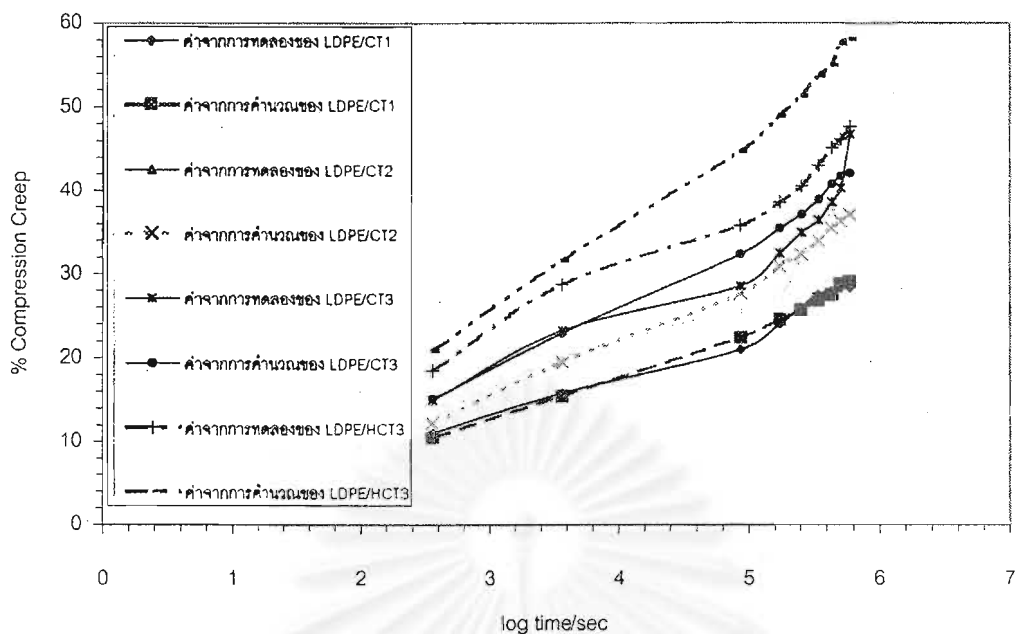
คำนวณได้จากสมการของ Mill และ Gilchrist มีมีแนวโน้มและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่เชื่อถือได้



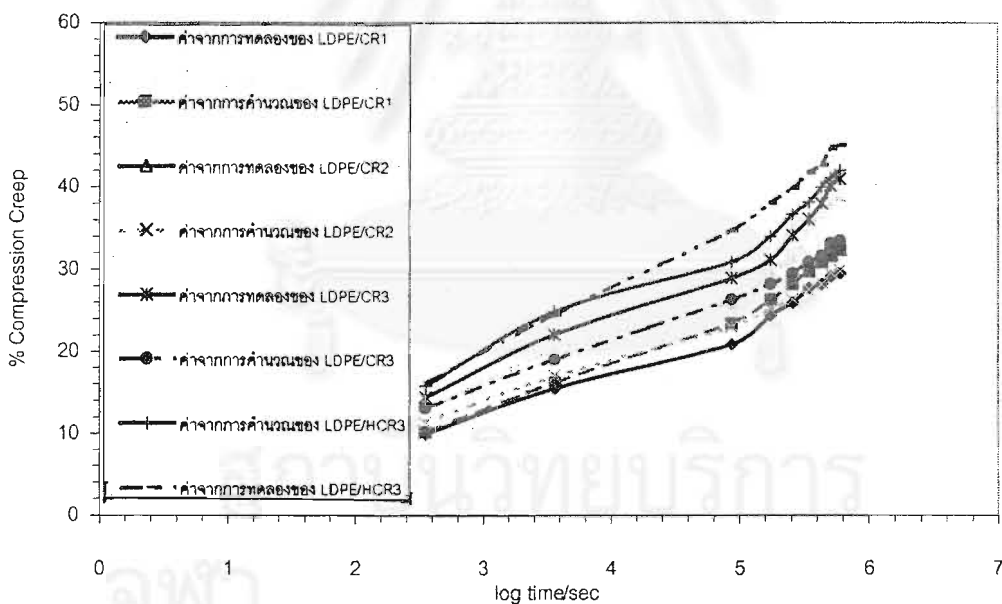
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบ ภายใต้น้ำหนัก 5 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ



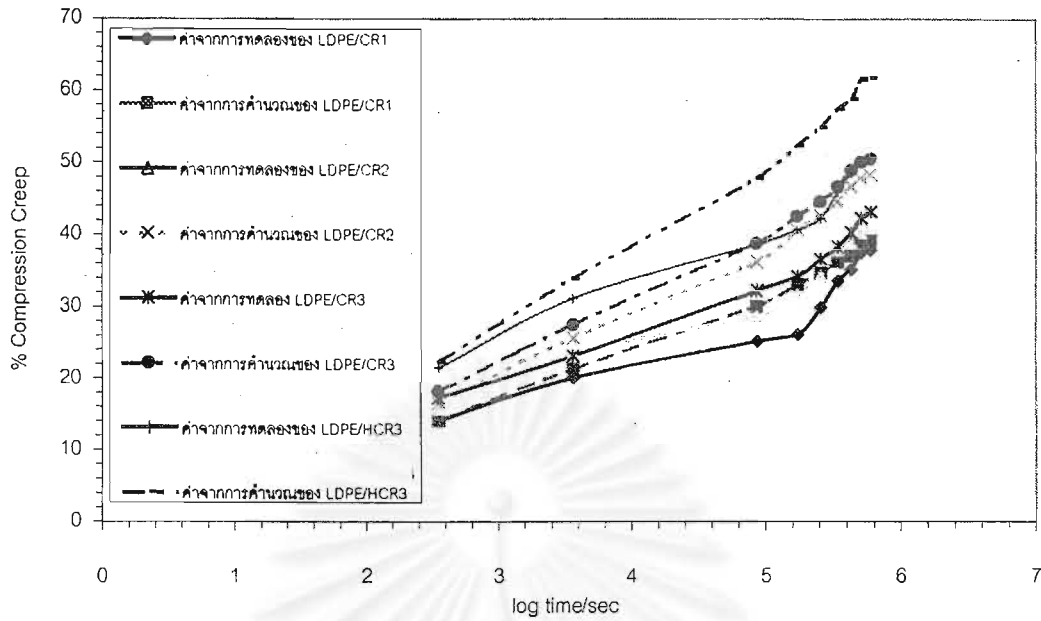
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวภายใต้ น้ำหนัก 5 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ



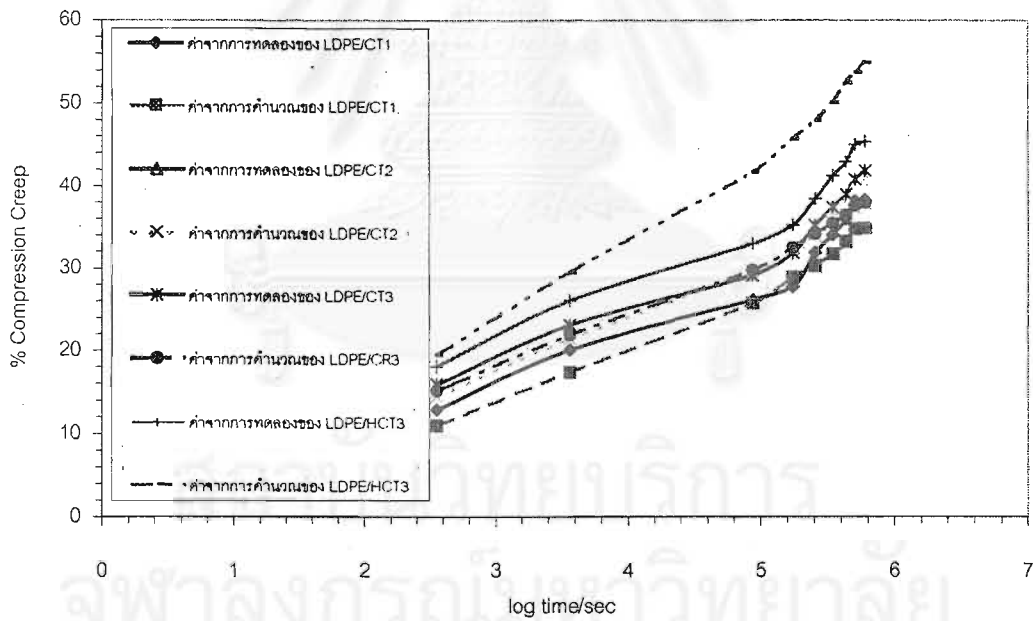
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบ ภายใต้น้ำหนัก 10 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใย มะพร้าวภายใต้ น้ำหนัก 10 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบ ภายใต้น้ำหนัก 15 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ

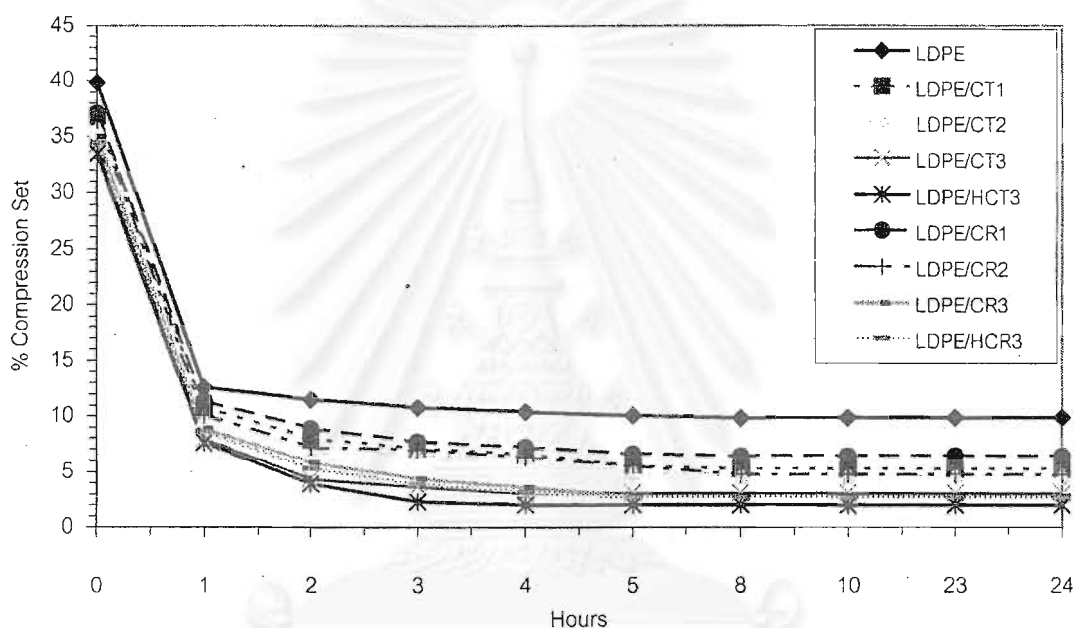


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การคืบ ของโฟมตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวภายใต้ น้ำหนัก 15 กก. จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณ



### 4.3.2 ความสามารถในการคืนตัว

ความสามารถในการคืนตัวของโพลีเอทิลีนบอกถึงความยืดหยุ่นตัวของโพลีเอทิลีนซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของเซลล์และจำนวนเซลล์แบบเปิด โดยโพลีเอทิลีนที่มีขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าและจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าจะมีความยืดหยุ่นตัวสูง แต่ในทางกลับกันจะมีความแข็งแรงที่ต่ำ ในการทดลองได้วัดค่า % Compression Set ของโพลีเอทิลีนแต่ละตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ กัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมความสามารถในการคืนตัวของโพลีเอทิลีน รูปที่ 4.28 แสดงค่า % Compression Set ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีเอทิลีนตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส



รูปที่ 4.28 ค่า % Compression Set ของโพลีเอทิลีนแต่ละตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.28 พบว่าโพลีเอทิลีนตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสมีค่า % Compression Set ต่ำกว่าโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งบอกได้ถึงความสามารถในการคืนตัวที่ดีกว่า โดยค่า % Compression Set จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเส้นใยเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีเอทิลีนตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลสในอัตราส่วนเท่ากันพบว่าโพลีเอทิลีนที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีค่า % Compression Set ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาโพลีเอทิลีนตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยเซลลูโลสพบว่าโพลีเอทิลีนดังกล่าวมีค่า % Compression Set ต่ำกว่าโพลีเอทิลีนตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลส เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีเอทิลีนที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบและผงเส้นใยมะพร้าวพบว่าโพลีเอทิลีนที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบมีค่า % Compression Set ต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมบัติต่าง ๆ เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และจำนวนเซลล์แบบเปิด กล่าวคือ โพลีเอทิลีนที่มีขนาดของ

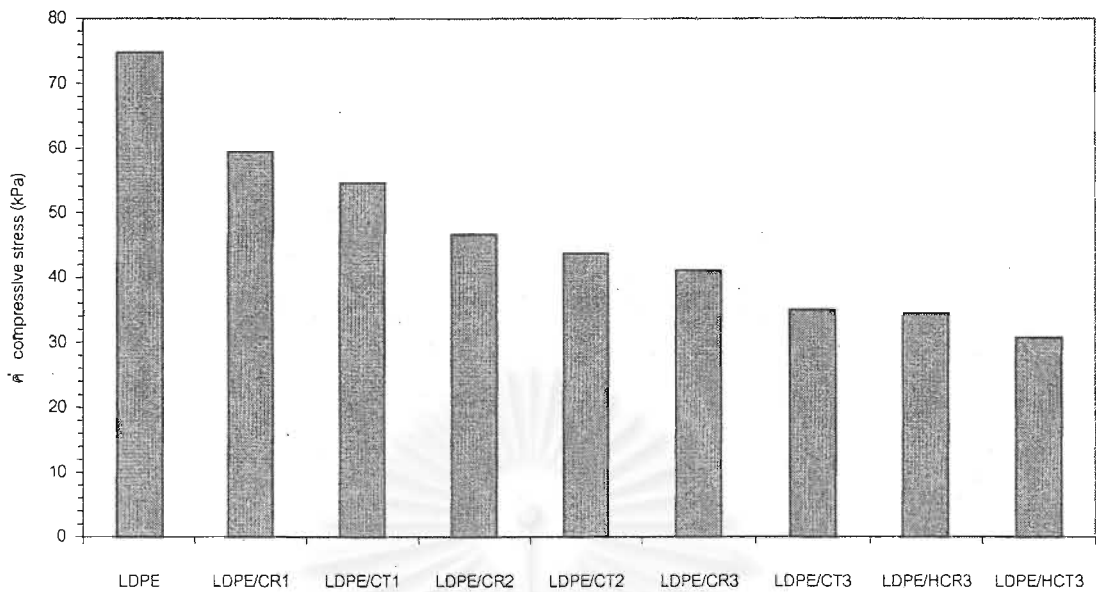
เซลล์ใหญ่กว่าและจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าจะมีความสามารถในการคืนตัวที่ดีกว่า (นั่นคือมีค่า % Compression Set ที่ต่ำกว่า) ซึ่งโฟมที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบมีเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่า

### 4.3.3 ความทนแรงกด

ความแข็งแรง ความสามารถในการรับแรงกดของโฟมพลาสติกจะสัมพันธ์กับรูปร่างเซลล์ ขนาดของเซลล์ รวมถึงจำนวนเซลล์แบบเปิดในโครงสร้างของโฟมพลาสติก โดยโฟมพลาสติกที่มีจำนวนเซลล์แบบเปิดน้อยจะมีความสามารถในการกักเก็บแก๊สไว้ในโครงสร้างเพื่อช่วยในการรองรับแรงกดจากภายนอกที่มากกระทำกับโฟมพลาสติก ในขณะที่เดียวกันโฟมที่มีจำนวนเซลล์แบบเปิดจำนวนมากเมื่อมีแรงกดจากภายนอกมากกระทำกับโฟมพลาสติก แก๊สที่อยู่ในเนื้อโฟมพลาสติกจะแพร่และกระจายตัวออกจากเนื้อโฟมพลาสติกทำให้รับแรงกดจากภายนอกได้ลดลง [27] นอกจากนี้ความหนาแน่นของโฟมพลาสติกก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ผลต่อความทนแรงกดของโฟมพลาสติกด้วย [1]

เมื่อพิจารณาขนาดของเซลล์ โฟมพลาสติกที่มีขนาดเซลล์เล็กกว่าจะมีการกระจายแรงที่เกิดจากแรงกดภายนอกไปยังเซลล์แต่ละเซลล์ทำให้สามารถทนต่อแรงกดได้ดีกว่าโฟมพลาสติกที่มีขนาดเซลล์ใหญ่กว่า ในอีกทางหนึ่งเมื่อพิจารณารูปร่างของเซลล์ เซลล์ที่มีรูปร่างทรงกลมจะมีความสามารถในการรับและกระจายแรงกดจากภายนอกได้ดีกว่าเซลล์ที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยมและวงรีตามลำดับ

รูปที่ 4.29 แสดงค่าความทนแรงกดของโฟมแต่ละตัวอย่าง (ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง) ของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส พบว่าโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงกดต่ำสุดเนื่องมาจากมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากที่สุด ขนาดของเซลล์ใหญ่ที่สุด นอกจากนี้เซลล์ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นวงรี ซึ่งตามทฤษฎีเป็นรูปร่างเซลล์ที่มีการรับและกระจายแรงได้ดีที่สุด [1]



รูปที่ 4.29 ความทนแรงกดของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสแต่ละตัวอย่าง

Zhang และ Ashby [27] ได้ศึกษาเกี่ยวกับค่า gas contribution เพื่อนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมในการรับแรงกดของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ 4.2

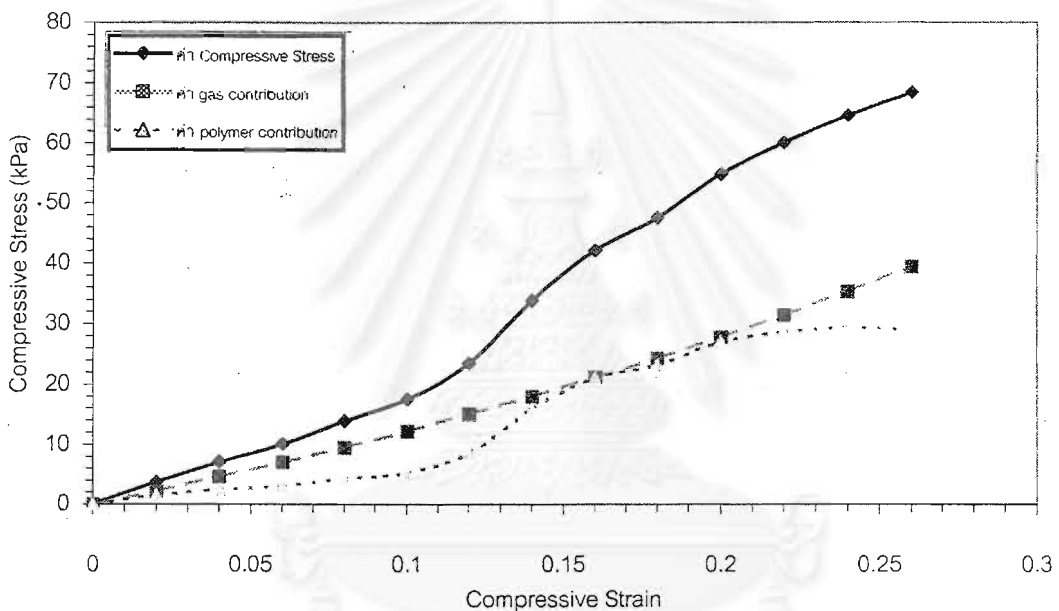
$$\sigma = \sigma_0 + \frac{P_0 \varepsilon}{(1 - \varepsilon - \frac{\rho_f}{\rho_p})} \quad (4.2)$$

- เมื่อ
- $\sigma$  = ค่า Compressive Stress (กิโลพาสคาล)
  - $\sigma_0$  = ค่า Elastic Buckling Stress (กิโลพาสคาล)
  - $P_0$  = ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 101.325 กิโลพาสคาล
  - $\varepsilon$  = ค่า Compressive Strain
  - $\rho_f$  = ความหนาแน่นของพลาสติกโพลี (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
  - $\rho_p$  = ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

เนื่องจากในการทดสอบความต้านทานแรงกดได้ก่ดขึ้นทดสอบเพียง 25%ของความหนาขึ้นทดสอบเท่านั้น ทำให้ไม่ทราบพฤติกรรมในการรับแรงกดของโพลีตัวอย่างในช่วง elastic buckling stress ดังนั้นสำหรับการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ จะนำเฉพาะค่า

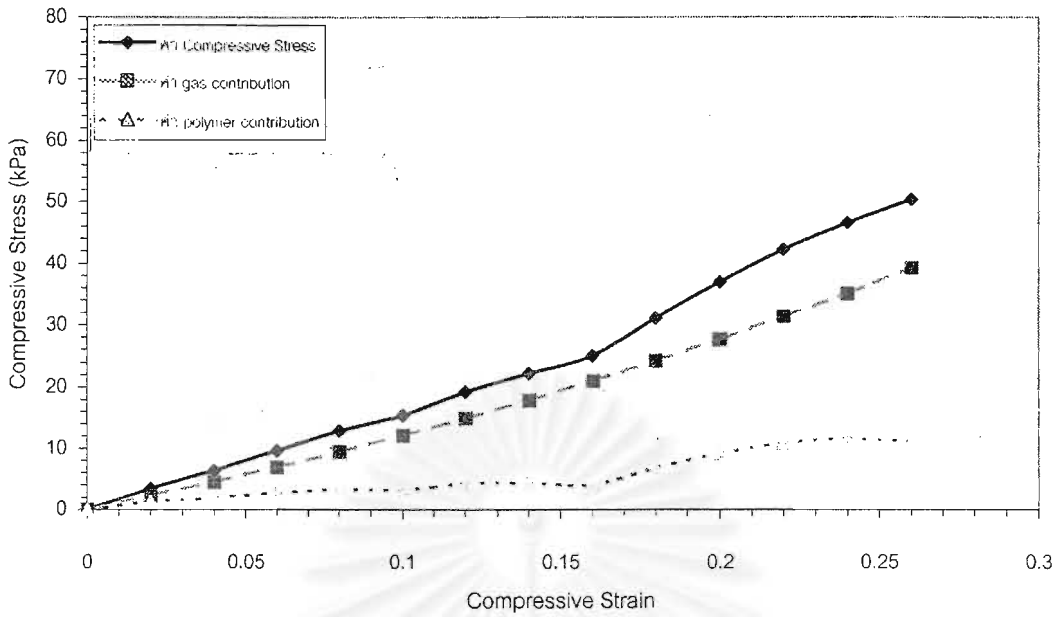
$\frac{P_0 \varepsilon}{(1 - \varepsilon - \frac{\rho_f}{\rho_p})}$  มาพิจารณาเท่านั้น ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณ gas contribution

ในโพลิเมอร์พลาสติกที่ถูกกด และสามารถหาค่า polymer contribution ได้จากผลต่างระหว่างค่า Compressive Stress กับค่า gas contribution ซึ่งค่าเหล่านี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมในการรับแรงกดของโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส รูปที่ 4.30 - 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress กับค่า Compressive Strain ค่า gas contribution และค่า polymer contribution ของโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

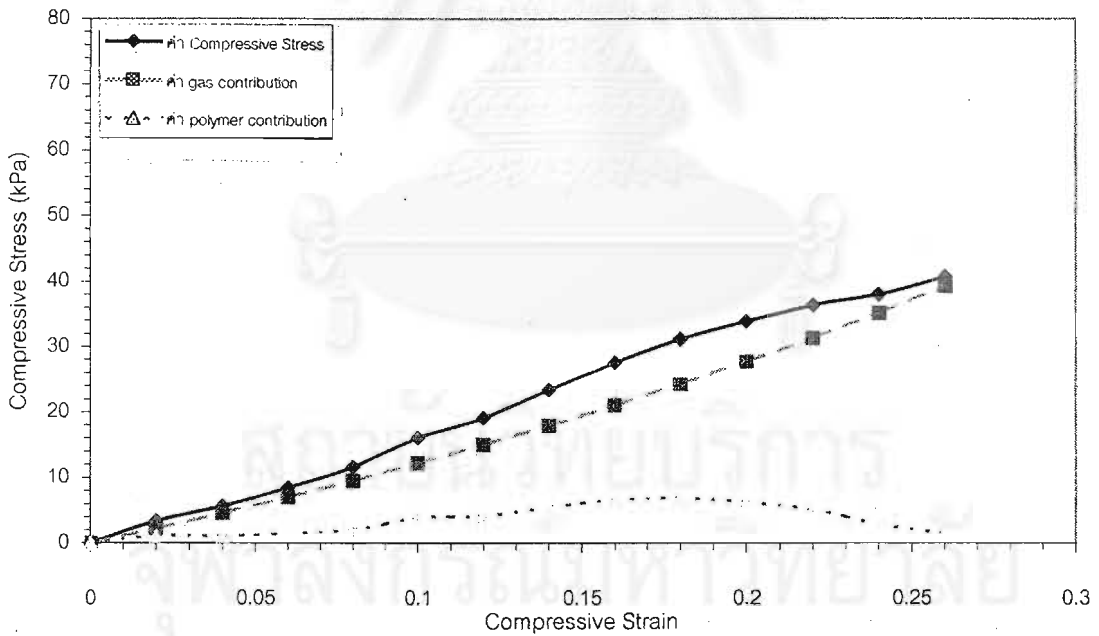


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

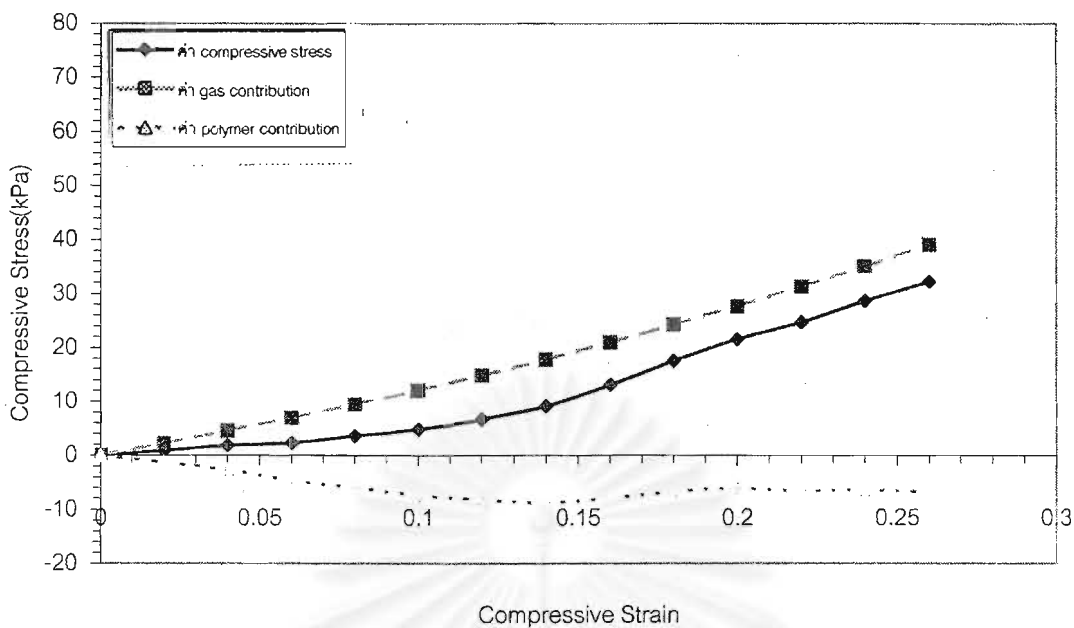


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลิเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยผ้ายดียบ ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก

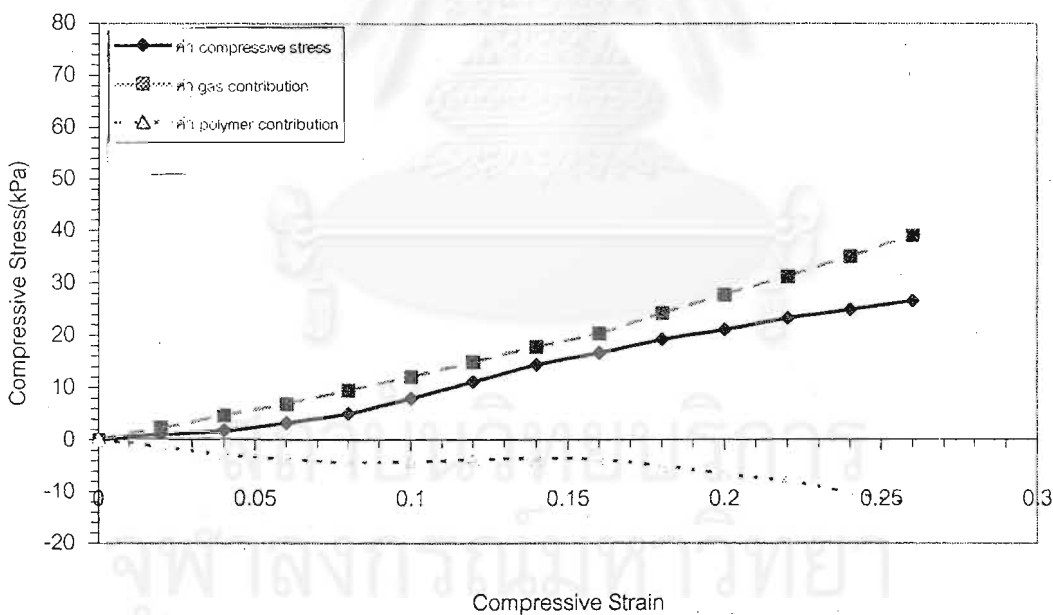


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลิเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยผ้ายดียบ ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก

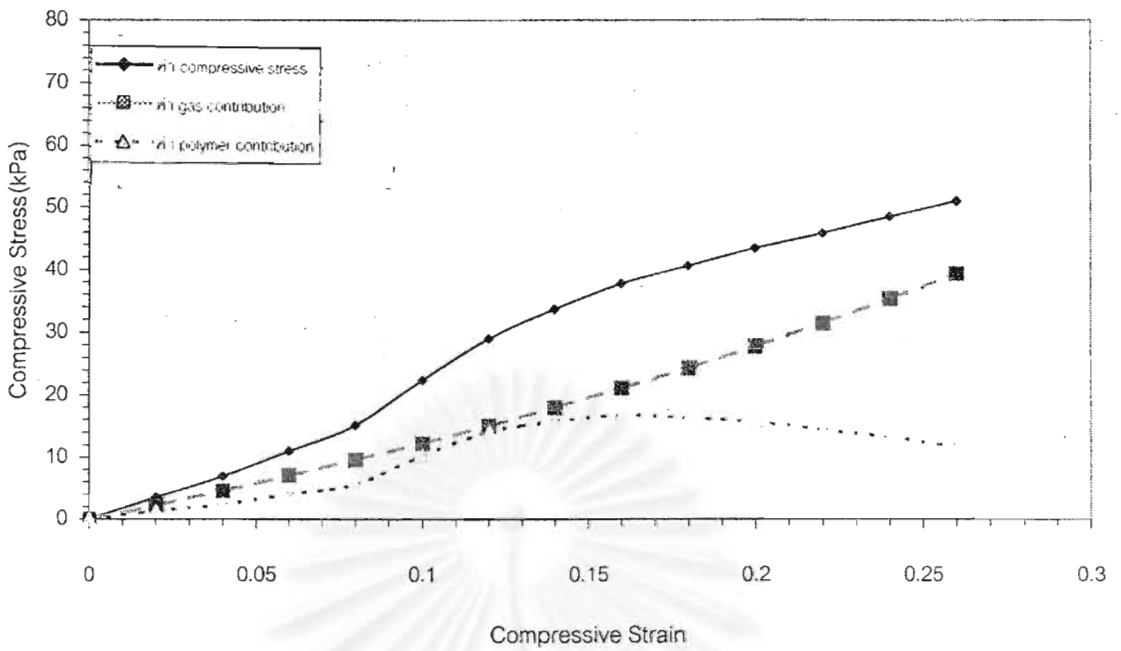




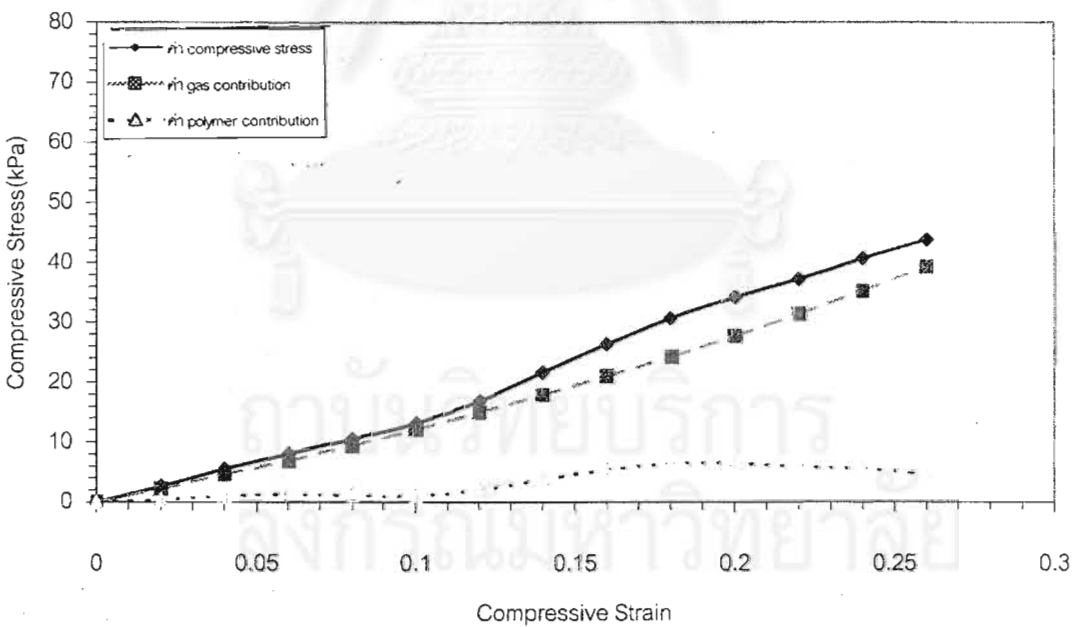
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก



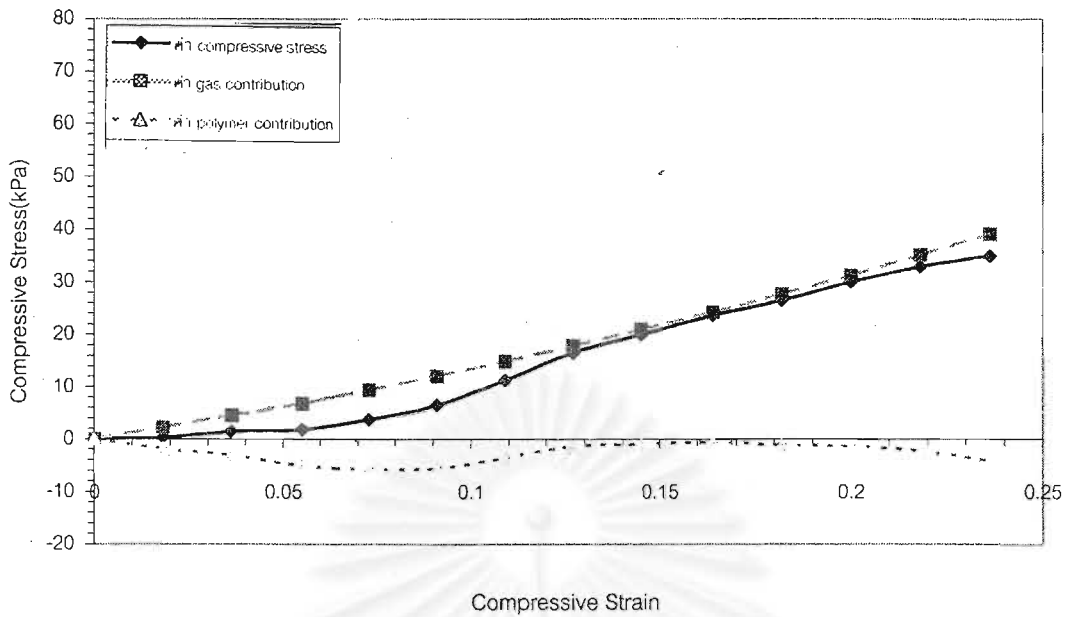
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก



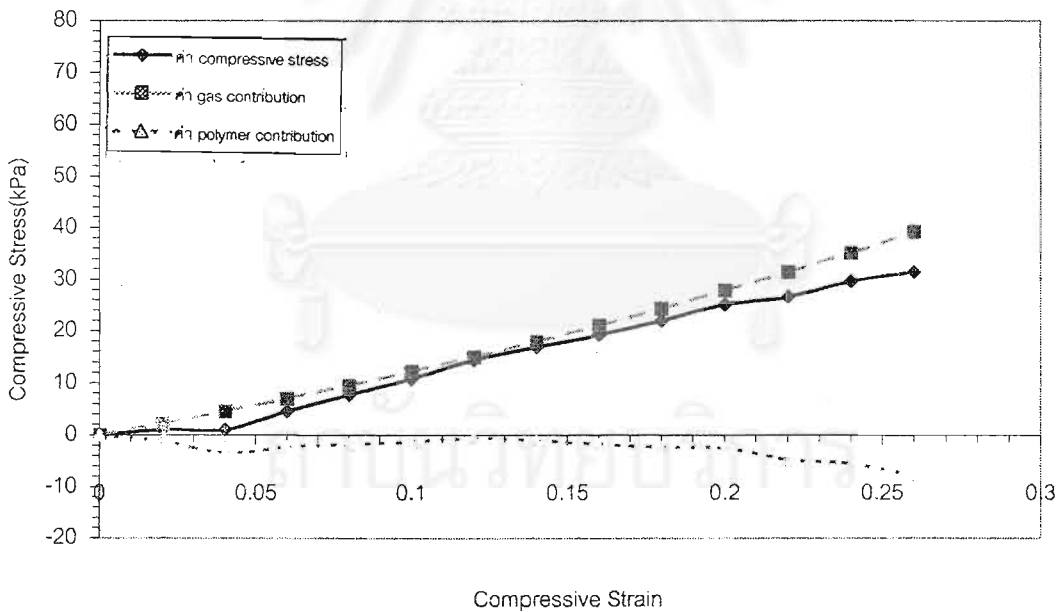
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของฟิล์ม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของฟิล์ม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Stress ค่า gas contribution และค่า polymer contribution กับค่า Compressive Strain ของโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.30 ในกรณีของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเฟสที่เป็นแก๊สและเฟสพอลิเมอร์มีอิทธิพลใกล้เคียงกันในการรับแรงกดจากภายนอก (ค่า Compressive Strain 0 – 0.2) ซึ่ง Zhang และ Ashby ได้อธิบายว่า การที่เฟสพอลิเมอร์ช่วยรับแรงกระแทกนั้นเกิดจากแกนของเซลล์เกิดการโค้งงอและผนังเซลล์เกิดการยืดตัว [27] แต่เมื่อค่า Compressive Strain มีค่าเพิ่มขึ้น (มากกว่า 0.2) เฟสพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะมีอิทธิพลน้อยลงต่อการรับแรงกด เนื่องจากโฟมพลาสติกเกิดการแตกของผนังเซลล์และยุบตัวเนื่องจากแรงภายนอก และกักเก็บแก๊สไว้ในเซลล์ ทำให้เฟสแก๊สมีอิทธิพลในการรับแรงกดมากกว่าเฟสพอลิเมอร์

สำหรับความทนแรงกดของโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลส พบว่าในโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 1 % และ 2 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.31 และ 4.32) และโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 1 % และ 2 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.35 และ 4.36) เฟสแก๊สมีอิทธิพลในการรับแรงกดจากภายนอกเหนือกว่าเฟสผสมของพอลิเมอร์และเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกเฟสระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์ โดยไม่มี interphase bonding ระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการกระจายแรงที่ไม่ดีในเฟสผสมของพอลิเมอร์และเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้โฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลสมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่า ขนาดของเซลล์ที่ใหญ่กว่า และรูปร่างเซลล์ไม่เป็นรูปทรงกลม ทำให้ความทนแรงกดมีค่าต่ำลง

ในกรณีของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบและผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.33 และ 4.34) และโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวและผงเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.37 และ 4.38) พบว่าค่า polymer contribution มีค่าเป็นลบ นั้นหมายถึง ค่า gas contribution มีค่ามากกว่าค่า Compressive Stress ของโฟมตัวอย่าง ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เป็นไปไม่ได้ตามหลักความเป็นจริง แสดงว่าทฤษฎีของ Zhang และ Ashby ไม่สามารถนำมาใช้กับโฟมตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดนี้ได้

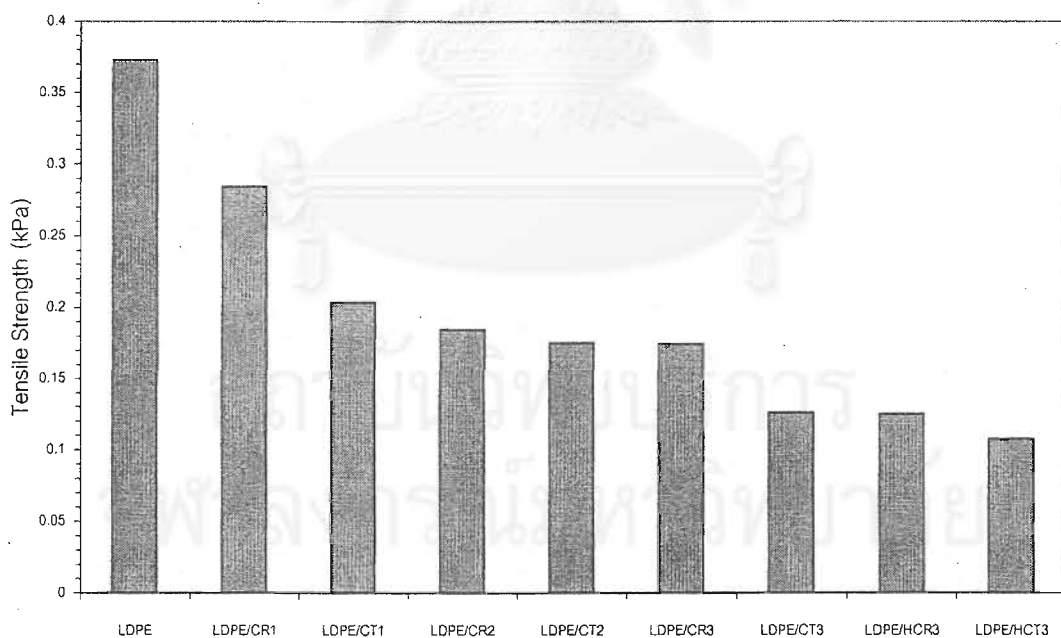
#### 4.3.4 ความทนแรงดึง

ความทนแรงดึงของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสแต่ละตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.48 โดยพบว่าโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลสมีค่าความทนแรงดึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโฟม LDPE เนื่องจากโฟมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างเซลล์เปลี่ยนไป กล่าวคือมีจำนวนเซลล์เปิดเพิ่มขึ้น และขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความทนแรงดึงลดลง (เมื่ออัตราส่วนของเส้นใยเพิ่มขึ้นนอกจากนี้เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสยังจัดตัวแยกเฟสกับเฟสพอลิเมอร์ และไม่มี interphase bonding ระหว่าง

เฟสพอลิเมอร์กับเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทแรงระหว่างเฟสพอลิเมอร์กับเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ส่งผลให้โพลีเมอร์ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสมีความทนแรงดึงต่ำกว่าโพลีเมอร์ LDPE

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงระหว่างโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนเส้นใยเท่ากัน พบว่าโพลีเมอร์ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีความทนแรงดึงต่ำกว่า เนื่องจากโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใย และจัดตัวแยกเฟสกับเนื้อโพลีเมอร์ ทำให้กระจายตัวไม่ดีในเนื้อโพลีเมอร์พลาสติก ในขณะที่เส้นใยมะพร้าวมีการกระจายตัวที่ดีกว่า นอกจากนี้โพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบยังมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่า และขนาดของเซลล์ใหญ่กว่า ทำให้โพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีความทนแรงดึงต่ำกว่า

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ผสมผงเส้นใยเซลลูโลสกับโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเซลลูโลสพบว่าโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ผสมผงเส้นใยเซลลูโลสมีความทนแรงดึงต่ำกว่า เมื่อพิจารณาโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยเซลลูโลสพบว่าโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ มีความทนแรงดึงต่ำกว่าโพลีเมอร์ LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว ผลการทดลองเหล่านี้สามารถอธิบายได้จากสมบัติต่าง ๆ ของลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และจำนวนเซลล์แบบเปิดที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.39 ค่าความทนแรงดึงของโพลีเมอร์พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสแต่ละตัวอย่าง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เส้นใยเซลลูโลสจากฝ้ายดิบและกามมะพร้าว รวมทั้งผงของเส้นใยทั้งสองชนิดที่ได้มาจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อปรับปรุงปัญหาการกระจายตัวของเส้นใย

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน

2) เส้นใยมะพร้าวมีการกระจายตัวในเนื้อโพลีพลาสติกดีกว่าเส้นใยฝ้ายดิบ โดยมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่า ส่วนผงเส้นใยเซลลูโลสมีการกระจายตัวในเนื้อโพลีพลาสติกดีกว่าเส้นใยเซลลูโลส

3) ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะเปลี่ยนไปเมื่อผสมเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส โดยจำนวนเซลล์แบบเปิดจะเพิ่มขึ้นและขนาดของเซลล์จะใหญ่ขึ้นตามปริมาณเส้นใยเซลลูโลสที่ใส่ลงไป

- ในอัตราส่วนเส้นใยเท่ากันโพลีตัวอย่างที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดเซลล์ใหญ่กว่าโพลีตัวอย่างที่ใส่เส้นใยมะพร้าว

- สำหรับโพลีตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยเซลลูโลสจะมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าโพลีที่ใส่เส้นใยเซลลูโลส

- เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบและโพลีตัวอย่างที่ผสมผงเส้นใยมะพร้าวพบว่าโพลีตัวอย่างที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่า

- นอกจากนี้เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสไม่มีการฝังตัวอยู่ในเนื้อโพลีพลาสติก แต่จัดตัวแยกเฟสออกมา ทำให้ไม่เกิด interphase bonding ระหว่างเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์

4) ค่าความทนแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกด และค่า %Compression set มีค่าต่ำลงและค่า %Compression creep มีค่าสูงขึ้น เมื่อใส่ปริมาณเส้นใยหรือผงเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในโพลีพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างเซลล์ที่เปลี่ยนไปและการจัดตัวแยกเฟสระหว่างเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในงานวิจัยสูตรที่ใช้ในการเตรียมโคมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อาจจะไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมสำหรับเตรียมโคมตัวอย่างที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ดังนั้นควรมีการปรับปรุงสูตรที่ใช้ในการเตรียมโคม เช่น เปลี่ยนชนิดของสารฟลู ปริมาณสารฟลู เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเตรียมโคมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส

2) จากงานวิจัยพบว่าวิธีในการขึ้นรูปโคมอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับเตรียมโคมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใส่เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปโคมพลาสติกได้ เช่น Injection Process, Heat and Chilled Process เป็นต้น ซึ่งอาจจะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า

3) จากผลการทดลองพบว่าเกิดการแยกเฟสระหว่างเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์ จึงน่าจะมีการปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสกับเฟสพอลิเมอร์ โดยใช้ coupling agent ที่เหมาะสม หรือการปรับปรุงคุณลักษณะผิวของเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสด้วยสารประกอบเคมีที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะช่วยให้เส้นใยเกิดการฝังตัวในเฟสพอลิเมอร์

4) โคมพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมยังมีอีกหลายชนิด ได้แก่ โคมพอลิโพรพิลีน โคมพอลิสไตรีน โคมพอลิยูรีเทน เป็นต้น ดังนั้นควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใส่เส้นใยเซลลูโลสลงไปโคมแต่ละชนิดเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาอุตสาหกรรมโคมพลาสติกต่อไป

## รายการอ้างอิง

- 1) D. Klempner and K. C. Frich. Handbook of polymeric foams and foam technology. New York: Hanser publisher, 1991.
- 2) Martin Grayson. Encyclopedia of composite materials and components. New York: Wiley-interscience, 1993.
- 3) Michael L. Berlins. Plastic engineering handbook of society of the plastics. New York: Chapman & hall, 1991.
- 4) Aaron L. Brody and Kenneth S. Marsh. The wiley encyclopedia of packaging technology. New York: John wiley & sons, 1995.
- 5) Zulkifli Mohamad Arief. "Foaming Behaviour dependence on base polymer parameters". MSC dissertation, U.M.I.S.T., 1983.
- 6) ช้างทอง มหาผาสูกัณณ์. "การศึกษากระบวนการโฟมของยางอีวีเอ/ยางธรรมชาติ". วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- 7) N. C. Hilyard and A. Cunningham, Low density cellular plastic (Physical basis of behaviour). London: Chapman & hall, 1991.
- 8) ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียน, 2527.
- 9) R. Gatcher and H. Muller, Plastics additives handbook, 4<sup>th</sup> ed. Munich: Hanser publisher, 1993.
- 10) G. L. A. Sims and H. A. S. Jafaar, "A chemical blowing agent system (CBAS) based on azodicarbonamide," Journal of Cellular Plastic 30 (March 1994):175-188.
- 11) H. A. S. Jafaar and G. L. A. Sims, "Thermal decomposition of azodicarbonamide," Cellular Polymers 12 (1993): 303-316.
- 12) องอาจ อมรพรวิวัฒน์ ชีระศักดิ์ ถาวรเศรษฐวิวัฒน์ และโสภณา รอดประเสริฐ, "อิทธิพลของค่า aspect ratio ที่มีต่อสมบัติของพลาสติกที่เสริมแรงด้วยแก้ว," โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ภาคีชาวสัตวศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- 13) อัจราพร ไสละสูตร, ความรู้เรื่องผ้า, พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สร้างสรรค์วิชาการ, 2539.

- 14) Srinoi Lekuthai, "Modification on adhesion property of coir fiber for reinforced plastics," Master's Thesis, Graduate School, Chulalongkorn University, 1990.
- 15) Barton L. and Mohammad F., "Structural materials from high density polyethylene and herbaceous fibers and method for production," U.S. 5194461 (March 1991)
- 16) Kuruvalla Joseph, Sabu Thomas C. Pavitharn and M. Brahmakumar, "Tensile properties of short sisal fibers-reinforced polyethylene composites," Journal of Applied Polymer Sciences 47, (1993):1731-1739.
- 17) Hsin-Lung Chen and Roger S. Porter, "Composite of polyethylene and kenaf, a natural cellulose fiber," Journal of Applied Polymer Sciences 54, (1994): 1981-1983.
- 18) Jayamol George, S. S. Bhagawan, N. Prabhakaran and Sabu Thomas, "Short pineapple-leaf-reinforced low density polyethylene composites," Journal of Applied Polymer Sciences 57, (1995): 843-854.
- 19) G. L. A. Sims and C. Khunniteekool, "Compression Moulded Ethylene Homo and Copolymer Foams II. effect of processing conditions and crystallinity on cell structure development," Cellular Polymer 13, (1997): 14-29.
- 20) ASTM D3575-93, Standard Test Methods For Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers, ASTM, Philadelphia, 1998.
- 21) ASTM D412-98a, Standard Test Methods For Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers Tension, ASTM, Philadelphia, 1998.
- 22) Majory L., Introductory textile science, 2<sup>nd</sup>. New York: Holt, Rinehart and winston, 1972.
- 23) J. Gordon Cook, Handbook of textile fibres (natural fibres). New York: Merrow publishing, 1984.
- 24) C. A. Daniels, Polymers: structure and properties. Pennsylvania: Technomic publishing, 1989.
- 25) A. Brent Strong, Fundamentals of composites manufacturing: materials methods and applications. Michigan: Society of manufacturing engineers, 1981.
- 26) N. J. Mills and Gilcrist, "Creep and recovery of polyolefin foams-deformation mechanism 33," Journal of Cellular Plastics (May 1997)

27) Duanghathai Pentrakoon, "Cushioning behaviour of polymeric foams," Doctoral dissertation, U.M.I.S.T., 1998.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน LDPE ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 3.13                      | 6.08   | 8.04  | 12.08  | 13.53  | 14.31  | 14.82  | 15.02   | 15.10   | 15.10   |
| 2                    | 3.10                      | 5.83   | 7.77  | 11.93  | 13.48  | 14.31  | 14.64  | 14.95   | 14.95   | 15.33   |
| 3                    | 3.14                      | 2.00   | 4.23  | 8.15   | 9.62   | 10.15  | 10.46  | 10.85   | 11.15   | 11.15   |
| 4                    | 3.11                      | 6.14   | 7.92  | 12.16  | 13.66  | 14.46  | 14.93  | 15.25   | 15.25   | 15.64   |
| 5                    | 3.12                      | 10.39  | 11.84 | 16.00  | 17.45  | 18.43  | 18.63  | 19.02   | 19.02   | 19.02   |
| ค่าเฉลี่ย            | 3.12                      | 6.24   | 8.11  | 12.24  | 13.68  | 14.46  | 14.85  | 15.17   | 15.24   | 15.40   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.28                      | 0.96   | 0.88  | 0.89   | 0.89   | 0.93   | 0.93   | 0.92    | 0.89    | 0.89    |



ตารางที่ 2 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 1%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.70                      | 8.98   | 11.02 | 16.08  | 17.92  | 19.81  | 21.13  | 22      | 12.84   | 23.40   |
| 2                    | 4.71                      | 5.19   | 7.04  | 12.04  | 14.07  | 15.56  | 17.19  | 17.96   | 18.70   | 18.96   |
| 3                    | 4.70                      | 9.13   | 11.11 | 16.21  | 18.19  | 19.63  | 23.29  | 22.37   | 22.83   | 23.52   |
| 4                    | 4.69                      | 12.59  | 14.63 | 19.48  | 21.78  | 23.15  | 24.52  | 25.56   | 26.48   | 26.67   |
| 5                    | 4.68                      | 9.07   | 10.93 | 16.07  | 18.03  | 19.66  | 21.17  | 22.31   | 22.87   | 23.33   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.69                      | 9.01   | 10.96 | 15.98  | 18.01  | 19.59  | 21.88  | 22.06   | 22.74   | 23.19   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.33                      | 0.78   | 0.79  | 0.78   | 0.79   | 0.79   | 0.76   | 0.79    | 0.80    | 0.81    |

ตารางที่ 3 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 2%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.28                      | 12.50  | 15.96 | 20.38  | 23.27  | 25.38  | 26.73  | 27.88   | 28.65   | 29.31   |
| 2                    | 5.28                      | 16.09  | 19.63 | 23.43  | 26.12  | 28.96  | 30.37  | 31.32   | 35.84   | 29.22   |
| 3                    | 5.34                      | 11.93  | 15.26 | 19.44  | 22.56  | 24.37  | 25.56  | 26.85   | 27.48   | 28.30   |
| 4                    | 5.22                      | 13.08  | 16.64 | 20.64  | 23.44  | 25.61  | 27.10  | 28.04   | 27.93   | 29.72   |
| 5                    | 5.26                      | 15.53  | 18.91 | 23.18  | 26.45  | 28.69  | 30.10  | 31.07   | 32.04   | 32.82   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.26                      | 13.80  | 17.26 | 21.51  | 24.47  | 26.59  | 27.96  | 29.02   | 29.63   | 29.93   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.51                      | 0.84   | 0.83  | 0.82   | 0.81   | 0.85   | 0.90   | 0.83    | 0.89    | 0.76    |

ตารางที่ 4 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 3%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.82                      | 15.65  | 13.13 | 27.17  | 31.30  | 36.61  | 37.17  | 39.22   | 41.09   | 42.17   |
| 2                    | 6.82                      | 15.48  | 21.51 | 26.88  | 30.84  | 36.13  | 36.86  | 38.37   | 40.65   | 41.51   |
| 3                    | 6.82                      | 15.11  | 21.10 | 26.24  | 30.38  | 35.44  | 36.20  | 38.06   | 39.87   | 40.42   |
| 4                    | 6.82                      | 18.79  | 24.63 | 29.53  | 33.62  | 38.52  | 39.22  | 40.85   | 42.81   | 43.83   |
| 5                    | 6.82                      | 10.48  | 16.08 | 21.00  | 24.88  | 30.00  | 30.56  | 33.00   | 33.80   | 34.20   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.82                      | 15.07  | 19.34 | 26.12  | 30.18  | 35.29  | 35.96  | 37.88   | 39.6    | 40.39   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 1.20   | 1.17  | 1.21   | 1.20   | 1.17   | 1.18   | 1.10    | 1.34    | 1.27    |

ตารางที่ 5 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 9.41                      | 13.96  | 19.38 | 24.25  | 28.92  | 32.24  | 33.94  | 35.92   | 37.50   | 38.77   |
| 2                    | 9.50                      | 14.98  | 20.85 | 26.09  | 30.21  | 34.26  | 36.60  | 38.60   | 40.21   | 41.83   |
| 3                    | 9.32                      | 18.52  | 23.99 | 28.90  | 32.87  | 37.17  | 39.20  | 40.82   | 42.24   | 39.68   |
| 4                    | 9.45                      | 10.43  | 15.95 | 20.86  | 24.95  | 28.83  | 30.96  | 33.01   | 34.56   | 36.20   |
| 5                    | 9.37                      | 14.34  | 19.60 | 24.85  | 28.69  | 32.61  | 34.71  | 36.77   | 38.18   | 39.80   |
| ค่าเฉลี่ย            | 9.41                      | 14.43  | 19.93 | 24.99  | 29.98  | 33     | 35.06  | 37.02   | 38.52   | 39.22   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.05                      | 0.90   | 0.91  | 0.91   | 0.89   | 0.91   | 0.93   | 0.89    | 0.89    | 0.76    |

ตารางที่ 6 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 1% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.08                      | 6.55   | 8.85  | 13.45  | 15.93  | 17.74  | 18.05  | 18.76   | 20.18   | 23.90   |
| 2                    | 4.10                      | 7.43   | 9.80  | 15.63  | 18.37  | 19.88  | 21.46  | 21.43   | 22.45   | 23.67   |
| 3                    | 4.06                      | 6.28   | 9.92  | 13.80  | 16.86  | 17.91  | 18.80  | 19.50   | 20.35   | 21.20   |
| 4                    | 4.08                      | 7.12   | 9.71  | 14.36  | 17.03  | 18.55  | 19.54  | 20.00   | 21.14   | 22.11   |
| 5                    | 4.08                      | 8.30   | 10.04 | 14.92  | 17.09  | 18.78  | 20.16  | 20.54   | 21.10   | 22.41   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.08                      | 7.11   | 9.66  | 14.41  | 17.03  | 18.44  | 19.58  | 20.04   | 20.84   | 21.88   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.02                      | 1.32   | 1.33  | 1.35   | 1.35   | 1.34   | 1.39   | 1.32    | 1.36    | 1.34    |

ตารางที่ 7 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 2% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.40                      | 11.06  | 14.90 | 11.36  | 12.98  | 25.40  | 27.45  | 38.38   | 39.91   | 40.64   |
| 2                    | 5.40                      | 11.05  | 15.05 | 21.72  | 23.66  | 25.81  | 28.17  | 30.32   | 32.04   | 32.60   |
| 3                    | 5.40                      | 10.92  | 15.38 | 21.65  | 23.54  | 25.69  | 27.84  | 30.20   | 31.91   | 32.99   |
| 4                    | 5.40                      | 6.42   | 14.66 | 16.86  | 18.88  | 20.79  | 23.11  | 25.35   | 26.91   | 27.76   |
| 5                    | 5.40                      | 15.14  | 18.76 | 25.57  | 27.50  | 29.55  | 31.77  | 34.12   | 35.61   | 36.46   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.40                      | 10.97  | 15.75 | 21.43  | 23.30  | 25.44  | 27.65  | 31.67   | 33.29   | 34.10   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 0.81   | 0.44  | 0.81   | 0.80   | 0.81   | 0.80   | 1.17    | 1.16    | 1.15    |



ตารางที่ 8 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.74                      | 12.44  | 18.25 | 22.44  | 25.85  | 28.05  | 29.27  | 30.10   | 31.22   | 31.95   |
| 2                    | 6.80                      | 10.83  | 15.88 | 20.19  | 22.86  | 24.81  | 25.80  | 26.67   | 27.74   | 28.08   |
| 3                    | 6.68                      | 10.96  | 16.09 | 19.78  | 23.04  | 25.00  | 26.06  | 26.96   | 27.96   | 28.48   |
| 4                    | 6.70                      | 9.78   | 15.03 | 23.64  | 21.98  | 24.22  | 24.84  | 26.43   | 26.73   | 27.47   |
| 5                    | 6.70                      | 10.98  | 15.45 | 18.90  | 21.96  | 23.41  | 24.39  | 25.49   | 26.27   | 26.67   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.74                      | 1.00   | 16.05 | 20.01  | 23.05  | 25.01  | 25.97  | 27.10   | 27.88   | 28.45   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.04                      | 1.69   | 1.68  | 1.69   | 1.67   | 1.69   | 1.70   | 1.66    | 1.67    | 1.69    |

ตารางที่ 9 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว 3%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 7.34                      | 12.27  | 17.43 | 23.37  | 26.53  | 29.50  | 32.67  | 35.52   | 37.52   | 39.17   |
| 2                    | 7.40                      | 11.98  | 17.49 | 23.06  | 35.52  | 29.27  | 32.22  | 35.56   | 37.52   | 39.01   |
| 3                    | 7.44                      | 12.43  | 16.94 | 23.17  | 26.47  | 29.02  | 32.24  | 35.29   | 37.25   | 38.82   |
| 4                    | 7.30                      | 8.95   | 13.90 | 19.4   | 22.55  | 25.52  | 28.46  | 31.24   | 33.52   | 34.74   |
| 5                    | 7.37                      | 14.81  | 20.08 | 25.85  | 29.04  | 31.92  | 35.00  | 37.96   | 39.73   | 41.35   |
| ค่าเฉลี่ย            | 7.37                      | 12.07  | 17.17 | 22.97  | 26.16  | 29.04  | 32.11  | 35.07   | 37.14   | 38.61   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.03                      | 0.74   | 0.75  | 0.75   | 0.77   | 0.75   | 0.77   | 0.78    | 0.74    | 0.77    |

ตารางที่ 10 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 3.13                      | 7.78   | 14.44 | 19.74  | 22.78  | 24.44  | 25.93  | 26.48   | 26.67   | 26.85   |
| 2                    | 3.10                      | 7.48   | 14.77 | 20     | 22.99  | 24.67  | 26.28  | 26.73   | 27.10   | 27.10   |
| 3                    | 3.14                      | 8.24   | 16.16 | 21.84  | 24.90  | 27.14  | 28.78  | 29.18   | 29.47   | 29.59   |
| 4                    | 3.11                      | 8.33   | 16.46 | 22.29  | 25.65  | 27.67  | 29.38  | 29.67   | 30.21   | 30.42   |
| 5                    | 3.12                      | 14.81  | 20.08 | 25.85  | 29.04  | 31.92  | 35     | 37.96   | 39.73   | 41.35   |
| ค่าเฉลี่ย            | 3.12                      | 12.07  | 17.17 | 22.97  | 26.16  | 29.04  | 32.11  | 35.07   | 37.14   | 38.61   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.28                      | 0.74   | 0.75  | 0.76   | 0.77   | 0.75   | 0.76   | 0.77    | 0.74    | 0.77    |

ตารางที่ 11 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 1% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.70                      | 10.83  | 15.63 | 21.75  | 25.42  | 25.83  | 27.29  | 28.33   | 30.42   | 31.46   |
| 2                    | 4.71                      | 11.11  | 15.96 | 22.13  | 25.74  | 26.60  | 27.87  | 28.94   | 29.70   | 30.51   |
| 3                    | 4.70                      | 11.77  | 16.67 | 23.33  | 26.67  | 27.56  | 28.89  | 30.27   | 30.89   | 31.11   |
| 4                    | 4.69                      | 10.20  | 14.71 | 20.39  | 23.69  | 24.51  | 26.47  | 26.78   | 27.45   | 27.84   |
| 5                    | 4.68                      | 11.30  | 16.30 | 21.74  | 25.00  | 26.52  | 27.83  | 28.26   | 28.35   | 28.70   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.69                      | 11.01  | 15.82 | 21.18  | 25.27  | 26.16  | 27.64  | 28.48   | 29.32   | 29.89   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.33                      | 1.16   | 1.15  | 1.37   | 1.10   | 1.12   | 1.04   | 1.10    | 1.10    | 1.07    |

ตารางที่ 12 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 2% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.28                      | 3.96   | 21.25 | 27.29  | 30.21  | 33.12  | 35.54  | 37.50   | 38.54   | 40.63   |
| 2                    | 5.28                      | 14.23  | 21.24 | 27.84  | 30.10  | 33.20  | 35.28  | 37.73   | 39.18   | 40.02   |
| 3                    | 5.34                      | 12.77  | 22.34 | 27.87  | 31.40  | 34.21  | 36.60  | 39.02   | 40.64   | 41.49   |
| 4                    | 5.22                      | 16.09  | 23.36 | 30.48  | 33.33  | 36.70  | 39.13  | 41.81   | 42.99   | 44.83   |
| 5                    | 5.26                      | 15.17  | 22.22 | 27.99  | 30.56  | 33.33  | 35.90  | 37.31   | 40.17   | 41.45   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.26                      | 14.41  | 22.07 | 28.27  | 31.09  | 34.09  | 36.44  | 38.58   | 40.25   | 41.75   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.51                      | 1.04   | 0.95  | 0.97   | 0.97   | 0.99   | 0.96   | 0.98    | 0.96    | 0.96    |

ตารางที่ 13 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.82                      | 17.33  | 27.64 | 34.44  | 37.51  | 39.56  | 42.00  | 45.20   | 45.56   | 47.96   |
| 2                    | 6.82                      | 22.22  | 32.67 | 38.89  | 41.62  | 42.44  | 44.67  | 46.13   | 46.89   | 48.00   |
| 3                    | 6.82                      | 17.48  | 27.42 | 34.83  | 37.98  | 39.96  | 42.47  | 44.27   | 46.07   | 46.97   |
| 4                    | 6.82                      | 17.93  | 27.59 | 35.63  | 37.93  | 40.46  | 43.17  | 45.52   | 45.98   | 48.05   |
| 5                    | 6.82                      | 17.65  | 28.14 | 35.02  | 38.14  | 39.82  | 42.67  | 43.78   | 46.24   | 47.29   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.82                      | 18.54  | 28.71 | 35.78  | 38.57  | 40.46  | 42.98  | 45.14   | 46.13   | 47.62   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 0.43   | 0.44  | 0.40   | 0.31   | 0.28   | 0.28   | 0.22    | 0.18    | 0.20    |



ตารางที่ 14 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 9.41                      | 15.51  | 24.72 | 30.61  | 33.47  | 35.60  | 37.64  | 39.46   | 40.77   | 41.95   |
| 2                    | 9.50                      | 14.84  | 23.66 | 29.25  | 32.04  | 34.41  | 35.91  | 37.63   | 38.75   | 39.35   |
| 3                    | 9.32                      | 15.16  | 23.37 | 28.87  | 32.13  | 35.05  | 35.78  | 37.46   | 38.32   | 39.73   |
| 4                    | 9.45                      | 17.32  | 27.59 | 34.18  | 37.42  | 40.25  | 41.97  | 44.05   | 45.97   | 47.54   |
| 5                    | 9.37                      | 16.34  | 25.61 | 32.29  | 35.41  | 38.73  | 40.15  | 41.95   | 43.61   | 45.12   |
| ค่าเฉลี่ย            | 9.41                      | 15.80  | 24.89 | 30.91  | 33.99  | 36.66  | 38.13  | 39.96   | 41.11   | 41.98   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.05                      | 1.55   | 1.55  | 1.57   | 1.54   | 1.54   | 1.56   | 1.56    | 1.63    | 1.67    |

ตารางที่ 15 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 1% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.08                      | 10.13  | 15.74 | 21.28  | 24.81  | 26.38  | 27.87  | 28.51   | 29.57   | 30.00   |
| 2                    | 4.10                      | 10.06  | 15.37 | 21.26  | 24.63  | 26.11  | 27.79  | 28.21   | 29.26   | 29.68   |
| 3                    | 4.06                      | 10.32  | 15.58 | 21.05  | 24.63  | 36.49  | 28.42  | 28.84   | 29.47   | 29.81   |
| 4                    | 4.08                      | 9.59   | 15.51 | 19.80  | 23.27  | 24.49  | 26.53  | 26.94   | 28.24   | 28.57   |
| 5                    | 4.08                      | 9.89   | 15.37 | 21.05  | 24.63  | 25.89  | 27.92  | 28.42   | 29.05   | 29.47   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.08                      | 9.98   | 15.51 | 20.88  | 24.40  | 25.91  | 27.71  | 28.18   | 29.10   | 29.52   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.02                      | 0.40   | 0.33  | 0.45   | 0.44   | 0.48   | 0.43   | 0.44    | 0.39    | 0.40    |

ตารางที่ 16 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 2% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.40                      | 13.06  | 20.08 | 25.92  | 27.35  | 31.90  | 33.06  | 36.12   | 37.90   | 39.79   |
| 2                    | 5.40                      | 13.10  | 19.96 | 25.81  | 27.02  | 31.85  | 33.87  | 35.89   | 37.90   | 38.51   |
| 3                    | 5.40                      | 12.24  | 19.39 | 24.89  | 26.73  | 31.63  | 32.65  | 35.75   | 37.63   | 35.59   |
| 4                    | 5.40                      | 13.40  | 20.66 | 26.80  | 28.25  | 32.99  | 35.05  | 37.32   | 39.18   | 40.12   |
| 5                    | 5.40                      | 13.00  | 19.60 | 25.60  | 27.00  | 31.52  | 33.32  | 35.40   | 38.00   | 38.88   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.40                      | 12.96  | 19.95 | 25.80  | 27.27  | 31.98  | 33.85  | 37.75   | 38.11   | 39.37   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 0.28   | 0.32  | 0.32   | 0.33   | 0.32   | 0.36   | 0.35    | 0.29    | 0.34    |

ตารางที่ 17 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.74                      | 12.44  | 19.59 | 24.93  | 28.69  | 30.30  | 33.58  | 35.35   | 36.57   | 37.88   |
| 2                    | 6.80                      | 9.69   | 16.49 | 22.47  | 26.19  | 27.92  | 31.13  | 32.87   | 34.23   | 35.38   |
| 3                    | 6.68                      | 13.40  | 20.83 | 26.80  | 30.10  | 32.16  | 35.38  | 37.32   | 38.56   | 9.57    |
| 4                    | 6.70                      | 14.25  | 21.49 | 27.45  | 31.28  | 33.19  | 36.59  | 38.29   | 39.79   | 40.72   |
| 5                    | 6.70                      | 14.73  | 22.19 | 28.57  | 32.31  | 34.07  | 37.58  | 39.56   | 41.09   | 41.97   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.74                      | 12.89  | 20.08 | 25.98  | 29.67  | 31.46  | 34.82  | 36.61   | 37.99   | 38.95   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.04                      | 1.41   | 1.39  | 1.41   | 1.55   | 1.39   | 1.42   | 1.41    | 1.43    | 1.41    |

ตารางที่ 18 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 7.34                      | 13.43  | 21.05 | 25.66  | 28.21  | 31.58  | 37.34  | 34.02   | 35.83   | 36.84   |
| 2                    | 7.40                      | 15.37  | 23.40 | 28.61  | 31.68  | 35.22  | 36.26  | 38.30   | 40.43   | 41.13   |
| 3                    | 7.44                      | 13.17  | 21.46 | 27.22  | 35.22  | 33.76  | 34.83  | 37.07   | 39.27   | 40.09   |
| 4                    | 7.30                      | 17.95  | 26.25 | 31.85  | 35.09  | 38.47  | 39.67  | 41.60   | 43.68   | 44.74   |
| 5                    | 7.37                      | 15.37  | 24.13 | 29.51  | 32.93  | 36.34  | 37.56  | 39.27   | 41.95   | 42.68   |
| ค่าเฉลี่ย            | 7.37                      | 15.01  | 23.22 | 28.47  | 32.46  | 34.94  | 36.02  | 37.95   | 40.10   | 40.95   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.03                      | 1.41   | 1.39  | 1.41   | 1.55   | 1.38   | 1.41   | 1.41    | 1.43    | 1.41    |

ตารางที่ 19 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 3.13                      | 10.94  | 16.41 | 20.79  | 24.07  | 27.35  | 30.63  | 33.25   | 35.45   | 36.32   |
| 2                    | 3.10                      | 11.67  | 15.30 | 20.34  | 26.39  | 29.49  | 34.14  | 36.46   | 39.51   | 38.64   |
| 3                    | 3.14                      | 12.02  | 17.12 | 23.32  | 25.96  | 30.38  | 33.89  | 37.50   | 38.70   | 39.09   |
| 4                    | 3.11                      | 12.44  | 19.15 | 23.98  | 27.36  | 31.59  | 32.09  | 32.34   | 34.83   | 35.82   |
| 5                    | 3.12                      | 11.25  | 18.34 | 23.72  | 27.24  | 30.95  | 35.26  | 36.67   | 39.36   | 40.59   |
| ค่าเฉลี่ย            | 3.12                      | 11.64  | 20.08 | 25.23  | 26.13  | 29.90  | 33.62  | 35.24   | 37.63   | 38.00   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.28                      | 1.06   | 1.67  | 1.66   | 1.09   | 1.11   | 1.04   | 0.96    | 0.97    | 0.91    |

ตารางที่ 20 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 1% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.70                      | 14.79  | 23.29 | 29.57  | 32.94  | 35.82  | 38.63  | 40.41   | 41..04  | 41.66   |
| 2                    | 4.71                      | 13.89  | 21.61 | 27.41  | 30.53  | 33.17  | 35.67  | 37.43   | 38.25   | 38.72   |
| 3                    | 4.70                      | 14.34  | 22.58 | 28.75  | 31.54  | 34.59  | 37.28  | 38.57   | 39.78   | 40.14   |
| 4                    | 4.69                      | 13.36  | 20.97 | 26.88  | 29.55  | 32.39  | 34.69  | 36.39   | 37.89   | 38.39   |
| 5                    | 4.68                      | 14.38  | 22.09 | 27.91  | 30.40  | 34.93  | 36.85  | 38.96   | 40.07   | 40.92   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.69                      | 14.10  | 22.09 | 28.06  | 30.96  | 34.14  | 36.58  | 38.25   | 39.37   | 39.93   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.33                      | 1.14   | 1.15  | 1.13   | 1.16   | 1.11   | 1.15   | 1.11    | 1.03    | 1.03    |



ตารางที่ 21 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 2% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.28                      | 16.04  | 24.18 | 30.11  | 32.97  | 36.26  | 38.46  | 40.00   | 41.98   | 43.08   |
| 2                    | 5.28                      | 15.31  | 21.63 | 27.55  | 27.79  | 33.67  | 35.71  | 36.94   | 37.14   | 39.79   |
| 3                    | 5.34                      | 16.16  | 23.58 | 29.48  | 32.31  | 35.59  | 35.35  | 39.74   | 42.14   | 43.49   |
| 4                    | 5.22                      | 16.67  | 23.78 | 30.36  | 33.16  | 36.44  | 38.89  | 40.44   | 43.11   | 43.33   |
| 5                    | 5.26                      | 15.46  | 22.27 | 27.92  | 30.93  | 33.81  | 36.08  | 37.65   | 39.51   | 40.29   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.26                      | 15.91  | 23.05 | 29.04  | 31.78  | 35.12  | 37.34  | 38.92   | 40.72   | 41.83   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.51                      | 0.90   | 0.96  | 0.96   | 0.96   | 0.91   | 0.91   | 0.93    | 1.11    | 0.94    |

ตารางที่ 22 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบ 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.82                      | 18.34  | 26.04 | 32.69  | 35.12  | 38.24  | 40.87  | 42.69   | 44.64   | 45.07   |
| 2                    | 6.82                      | 17.97  | 26.60 | 32.43  | 34.67  | 37.63  | 40.38  | 42.28   | 43.97   | 44.58   |
| 3                    | 6.82                      | 17.98  | 26.63 | 32.25  | 35.02  | 37.93  | 41.14  | 42.64   | 44.78   | 44.99   |
| 4                    | 6.82                      | 17.03  | 25.86 | 32.54  | 34.48  | 38.58  | 41.16  | 42.14   | 44.83   | 45.04   |
| 5                    | 6.82                      | 19.00  | 26.47 | 34.39  | 36.65  | 39.85  | 42.67  | 44.62   | 46.83   | 47.19   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.82                      | 18.06  | 26.03 | 32.91  | 35.17  | 38.37  | 41.23  | 42.92   | 44.98   | 45.34   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 0.60   | 0.48  | 0.57   | 0.56   | 0.53   | 0.53   | 0.55    | 0.56    | 0.55    |

ตารางที่ 23 ค่า %การคืบของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบ 3%โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 9.41                      | 23.78  | 35.14 | 44.09  | 45.29  | 48.92  | 51.89  | 54.05   | 56.11   | 57.02   |
| 2                    | 9.50                      | 21.14  | 31.19 | 37.90  | 40.48  | 38.24  | 45.48  | 48.19   | 49.19   | 50.09   |
| 3                    | 9.32                      | 21.17  | 30.59 | 37.60  | 40.24  | 42.21  | 44.94  | 48.00   | 49.18   | 49.88   |
| 4                    | 9.45                      | 21.15  | 29.89 | 37.14  | 39.08  | 41.37  | 44.14  | 46.44   | 47.77   | 48.51   |
| 5                    | 9.37                      | 20.55  | 29.61 | 36.95  | 39.35  | 41.48  | 44.34  | 46.87   | 48.64   | 49.19   |
| ค่าเฉลี่ย            | 9.41                      | 21.51  | 31.16 | 38.69  | 40.76  | 42.26  | 45.99  | 48.54   | 50.07   | 50.74   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.05                      | 1.29   | 1.35  | 1.44   | 1.27   | 1.46   | 1.34   | 1.27    | 1.31    | 1.32    |

ตารางที่ 24 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 1% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 4.08                      | 13.55  | 21.02 | 27.23  | 29.06  | 33.62  | 35.53  | 37.87   | 40.34   | 36.81   |
| 2                    | 4.10                      | 12.21  | 18.93 | 24.62  | 26.11  | 30.34  | 32.25  | 33.97   | 36.07   | 36.79   |
| 3                    | 4.06                      | 12.16  | 19.69 | 24.71  | 26.10  | 30.50  | 32.51  | 34.17   | 36.49   | 27.26   |
| 4                    | 4.08                      | 13.19  | 20.41 | 27.13  | 28.66  | 32.54  | 34.43  | 36.49   | 38.97   | 40.21   |
| 5                    | 4.08                      | 13.54  | 20.42 | 27.08  | 28.54  | 32.33  | 35.17  | 36.88   | 38.88   | 40.00   |
| ค่าเฉลี่ย            | 4.08                      | 12.88  | 20.06 | 26.12  | 27.65  | 31.81  | 33.91  | 35.81   | 38.07   | 38.18   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.02                      | 1.22   | 1.15  | 1.22   | 1.24   | 1.17   | 1.17   | 1.20    | 1.19    | 1.01    |

ตารางที่ 25 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 2% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 5.40                      | 16.34  | 24.55 | 31.68  | 33.86  | 38.12  | 40.30  | 42.08   | 43.56   | 44.50   |
| 2                    | 5.40                      | 14.38  | 21.57 | 27.89  | 29.03  | 33.33  | 35.51  | 36.91   | 38.34   | 39.43   |
| 3                    | 5.40                      | 15.53  | 23.29 | 29.98  | 32.24  | 36.00  | 38.35  | 40.00   | 41.14   | 42.35   |
| 4                    | 5.40                      | 14.51  | 21.76 | 28.09  | 29.89  | 33.63  | 35.82  | 32.41   | 38.68   | 39.56   |
| 5                    | 5.40                      | 14.47  | 22.22 | 27.85  | 30.04  | 35.70  | 36.54  | 37.28   | 38.59   | 39.69   |
| ค่าเฉลี่ย            | 5.40                      | 15.01  | 22.56 | 29.01  | 31.06  | 34.85  | 37.06  | 38.65   | 40.02   | 40.84   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0                         | 1.22   | 1.21  | 1.22   | 1.22   | 1.23   | 1.21   | 0.22    | 1.21    | 1.22    |

ตารางที่ 26 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 6.74                      | 15.82  | 23.56 | 28.86  | 31.73  | 35.11  | 38.22  | 39.11   | 40.44   | 41.56   |
| 2                    | 6.80                      | 16.14  | 24.09 | 29.64  | 32.36  | 35.91  | 38.86  | 40.23   | 41.59   | 42.64   |
| 3                    | 6.68                      | 15.65  | 23.17 | 28.48  | 31.30  | 34.78  | 37.39  | 38.04   | 39.78   | 40.52   |
| 4                    | 6.70                      | 15.65  | 23.48 | 28.78  | 30.43  | 30.65  | 38.04  | 38.69   | 40.13   | 41.07   |
| 5                    | 6.70                      | 15.55  | 23.11 | 28.22  | 31.38  | 34.80  | 37.78  | 38.89   | 40.00   | 41.11   |
| ค่าเฉลี่ย            | 6.74                      | 15.75  | 23.49 | 28.81  | 31.64  | 34.25  | 38.05  | 38.98   | 40.4    | 41.37   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.04                      | 0.39   | 0.38  | 0.39   | 0.43   | 0.68   | 0.37   | 0.43    | 0.39    | 0.41    |

ตารางที่ 27 ค่า %การคืบของโพลีเอทิลีน (PE) ที่ใส่ผงเส้นใยมะพร้าว 3% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบภายใต้ น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง             | %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |        |       |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                      | 60+1 วินาที               | 6 นาที | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120 ชม. | 144 ชม. | 168 ชม. |
| 1                    | 7.34                      | 15.91  | 23.09 | 29.76  | 32.26  | 33.98  | 35.91  | 37.63   | 39.27   | 40.22   |
| 2                    | 7.40                      | 18.36  | 21.58 | 34.29  | 37.12  | 39.29  | 41.19  | 43.42   | 45.66   | 46.65   |
| 3                    | 7.44                      | 17.41  | 25.41 | 32.42  | 35.06  | 36.94  | 39.06  | 40.71   | 42.78   | 43.53   |
| 4                    | 7.30                      | 17.07  | 25.23 | 32.71  | 34.58  | 36.92  | 38.79  | 39.95   | 42.24   | 42.76   |
| 5                    | 7.37                      | 17.72  | 25.22 | 32.50  | 33.41  | 36.36  | 37.86  | 40.23   | 42.05   | 43.18   |
| ค่าเฉลี่ย            | 7.37                      | 17.26  | 23.18 | 32.25  | 34.19  | 36.6   | 38.41  | 40.31   | 42.30   | 43.17   |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.03                      | 1.11   | 0.97  | 1.12   | 1.13   | 1.13   | 1.11   | 1.11    | 1.14    | 1.12    |



ตารางที่ 28 ค่า %การคืบ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Mills และ Gilcrist สำหรับการทดสอบภายใต้น้ำหนัก 5 กก.

| ตัวอย่าง  | ค่า %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |       |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 6 นาที                        | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120ชม. | 144ชม. | 168ชม. |
| LDPE      | 5.89                          | 8.71  | 12.30  | 13.18  | 14.13  | 14.45  | 15.14  | 15.49  | 15.63  |
| LDPE/CT1  | 7.94                          | 12.30 | 17.38  | 19.05  | 19.50  | 20.89  | 21.38  | 21.88  | 22.39  |
| LDPE/CT2  | 10.47                         | 16.26 | 23.44  | 25.70  | 27.54  | 28.84  | 29.51  | 30.19  | 30.90  |
| LDPE/CT3  | 12.36                         | 18.62 | 26.30  | 28.84  | 30.90  | 31.62  | 33.11  | 33.88  | 34.67  |
| LDPE/HCT3 | 13.80                         | 20.89 | 29.51  | 32.36  | 34.67  | 35.48  | 37.15  | 38.01  | 38.90  |
| LDPE/CR1  | 6.61                          | 10.47 | 15.49  | 17.38  | 18.19  | 19.05  | 19.49  | 20.42  | 20.89  |
| LDPE/CR2  | 10.72                         | 15.49 | 21.38  | 23.44  | 24.54  | 26.30  | 26.54  | 26.92  | 27.54  |
| LDPE/CR3  | 11.75                         | 16.98 | 23.44  | 25.12  | 26.30  | 28.18  | 28.44  | 28.84  | 29.01  |
| LDPE/HCR3 | 13.49                         | 20.42 | 28.84  | 30.90  | 33.11  | 34.67  | 35.48  | 36.31  | 37.15  |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 29 ค่า %การคืบ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Mills และ Gilcrist สำหรับการทดสอบภายใต้น้ำหนัก 10 กก.

| ตัวอย่าง  | ค่า %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |       |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 6 นาที                        | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120ชม. | 144ชม. | 168ชม. |
| LDPE      | 6.76                          | 9.77  | 13.80  | 15.14  | 15.48  | 16.22  | 16.98  | 17.38  | 17.78  |
| LDPE/CT1  | 10.47                         | 15.49 | 22.39  | 24.55  | 25.70  | 26.92  | 27.54  | 28.84  | 29.12  |
| LDPE/CT2  | 12.30                         | 19.49 | 27.54  | 30.90  | 32.36  | 33.88  | 35.48  | 36.31  | 37.15  |
| LDPE/CT3  | 15.14                         | 22.91 | 32.36  | 35.48  | 37.15  | 38.90  | 40.74  | 41.69  | 42.07  |
| LDPE/HCT3 | 20.89                         | 31.62 | 44.67  | 48.98  | 51.92  | 53.70  | 54.95  | 57.54  | 58.08  |
| LDPE/CR1  | 10.23                         | 16.22 | 23.44  | 26.30  | 28.18  | 29.81  | 30.90  | 31.62  | 32.36  |
| LDPE/CR2  | 11.48                         | 16.98 | 22.91  | 25.12  | 26.30  | 27.54  | 28.18  | 29.51  | 29.79  |
| LDPE/CR3  | 13.18                         | 19.05 | 26.30  | 28.18  | 29.51  | 30.90  | 31.62  | 33.11  | 33.42  |
| LDPE/HCR3 | 16.22                         | 24.55 | 34.67  | 38.02  | 39.81  | 41.69  | 42.66  | 44.67  | 45.08  |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 30 ค่า %การคืบ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Mills และ Gilcrist สำหรับการทดสอบภายใต้น้ำหนัก 15 กก.

| ตัวอย่าง  | ค่า %การคืบ ที่เวลาต่าง ๆ กัน |       |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 6 นาที                        | 1 ชม. | 24 ชม. | 48 ชม. | 72 ชม. | 96 ชม. | 120ชม. | 144ชม. | 168ชม. |
| LDPE      | 10.47                         | 15.49 | 21.38  | 23.44  | 24.55  | 25.70  | 26.30  | 27.54  | 27.79  |
| LDPE/CT1  | 14.13                         | 21.38 | 30.19  | 33.11  | 34.67  | 36.31  | 37.15  | 38.91  | 39.26  |
| LDPE/CT2  | 16.59                         | 25.70 | 36.31  | 40.74  | 42.66  | 44.67  | 46.77  | 47.86  | 48.31  |
| LDPE/CT3  | 18.19                         | 27.54 | 38.90  | 42.66  | 44.67  | 46.77  | 48.98  | 50.12  | 50.58  |
| LDPE/HCT3 | 22.39                         | 33.88 | 47.86  | 52.48  | 54.95  | 57.54  | 58.88  | 61.60  | 61.80  |
| LDPE/CR1  | 10.96                         | 17.38 | 25.70  | 28.84  | 30.19  | 31.62  | 33.11  | 34.67  | 34.75  |
| LDPE/CR2  | 14.45                         | 21.38 | 29.51  | 32.36  | 33.88  | 35.48  | 36.31  | 37.15  | 37.67  |
| LDPE/CR3  | 15.14                         | 21.88 | 29.65  | 32.43  | 34.04  | 35.32  | 36.36  | 37.49  | 37.84  |
| LDPE/HCR3 | 19.49                         | 29.51 | 41.69  | 45.71  | 47.86  | 50.12  | 52.48  | 53.70  | 54.95  |

ตารางที่ 31 ค่า %Compression Set ของโพลีเอทิลีน LDPE

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 0  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 8     | 10    | 15    | 23    | 24    |
| 1                    | 39.11  | 12.89 | 12.28 | 11.54 | 10.86 | 10.52 | 10.35 | 10.35 | 10.35 | 10.35 | 10.35 |
| 2                    | 40.19  | 12.66 | 10.63 | 9.97  | 9.3   | 9.14  | 9.14  | 9.14  | 9.14  | 9.14  | 9.14  |
| 3                    | 41.28  | 12.35 | 11.24 | 10.74 | 10.57 | 10.23 | 9.73  | 9.73  | 9.73  | 9.73  | 9.73  |
| 4                    | 39.72  | 12.26 | 11.59 | 10.75 | 10.42 | 9.91  | 9.75  | 9.75  | 9.75  | 9.75  | 9.75  |
| 5                    | 38.98  | 12.78 | 12.03 | 11.36 | 10.92 | 10.68 | 10.41 | 10.41 | 10.41 | 10.41 | 10.41 |
| ค่าเฉลี่ย            | 39.86  | 12.59 | 11.55 | 10.87 | 10.41 | 10.09 | 9.88  | 9.88  | 9.88  | 9.88  | 9.88  |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.93   | 0.27  | 0.65  | 0.62  | 0.66  | 0.61  | 0.52  | 0.52  | 0.52  | 0.52  | 0.52  |

ตารางที่ 32 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 1%โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 35.97  | 8.24  | 6.29  | 6.05 | 5.88 | 5.11 | 5.11 | 5.11 | 5.11 | 5.11 | 5.11 |
| 2                    | 37.82  | 14.74 | 11.64 | 9.40 | 8.89 | 5.44 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 4.65 |
| 3                    | 37.66  | 12.14 | 8.52  | 8.35 | 7.87 | 7.71 | 7.38 | 7.38 | 7.38 | 7.38 | 7.38 |
| 4                    | 36.34  | 9.31  | 6.27  | 5.39 | 5.23 | 4.90 | 4.90 | 4.90 | 4.90 | 4.90 | 4.90 |
| 5                    | 36.61  | 9.47  | 7.37  | 6.42 | 5.17 | 4.5  | 4.33 | 4.33 | 4.33 | 4.33 | 4.33 |
| ค่าเฉลี่ย            | 36.88  | 10.78 | 8.02  | 7.12 | 6.61 | 5.53 | 5.27 | 5.27 | 5.27 | 5.27 | 5.27 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.82   | 2.64  | 2.27  | 1.68 | 1.68 | 1.26 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.21 |

ตารางที่ 33 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ได้เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 0  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 8     | 10    | 15    | 23    | 24    |
| 1                    | 33.66  | 8.53  | 4.74  | 4.66  | 4.66  | 3.15  | 2.58  | 2.58  | 2.58  | 2.58  | 2.58  |
| 2                    | 34.04  | 8.1   | 5.67  | 5.13  | 4.59  | 3.51  | 2.96  | 2.96  | 2.96  | 2.96  | 2.96  |
| 3                    | 37.18  | 10.41 | 4.53  | 4.03  | 3.28  | 2.29  | 1.81  | 1.81  | 1.81  | 1.81  | 1.81  |
| 4                    | 38.52  | 14.92 | 13.18 | 13.02 | 12.52 | 11.31 | 10.66 | 10.66 | 10.66 | 10.66 | 10.66 |
| 5                    | 35.14  | 6.85  | 6.19  | 5.80  | 5.66  | 5.66  | 5.05  | 5.05  | 5.05  | 5.05  | 5.05  |
| ค่าเฉลี่ย            | 35.71  | 9.76  | 6.78  | 6.61  | 6.14  | 4.98  | 4.61  | 4.61  | 4.61  | 4.61  | 4.61  |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 2.08   | 3.15  | 3.62  | 3.67  | 3.66  | 3.64  | 3.59  | 3.59  | 3.59  | 3.59  | 3.59  |

ตารางที่ 34 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 34.35  | 9.35 | 5.48 | 4.68 | 4.03 | 4.03 | 4.03 | 4.03 | 4.03 | 4.03 | 4.03 |
| 2                    | 36.76  | 9.09 | 5.69 | 5.12 | 4.46 | 4.46 | 4.46 | 4.46 | 4.46 | 4.46 | 4.46 |
| 3                    | 29.17  | 7.56 | 3.49 | 2.71 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 |
| 4                    | 35.54  | 7.77 | 3.31 | 2.64 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 1.88 |
| 5                    | 35.24  | 6.11 | 3.58 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 |
| ค่าเฉลี่ย            | 34.21  | 7.98 | 4.31 | 3.61 | 3.06 | 3.06 | 3.06 | 3.06 | 3.06 | 3.06 | 3.06 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 2.95   | 1.31 | 1.17 | 1.19 | 1.16 | 1.16 | 1.16 | 1.16 | 1.16 | 1.16 | 1.16 |



ตารางที่ 35 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ใส่ผงเส้นใยฝ้ายดิบปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 34.76  | 9.48 | 4.35 | 1.41 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 |
| 2                    | 33.24  | 6.79 | 3.4  | 1.14 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 |
| 3                    | 32.93  | 8.89 | 4.6  | 3.9  | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 |
| 4                    | 32.99  | 5.69 | 3.77 | 2.49 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 |
| 5                    | 33.40  | 7.18 | 3.42 | 2.56 | 1.74 | 1.74 | 1.74 | 1.74 | 1.74 | 1.74 | 1.74 |
| ค่าเฉลี่ย            | 33.46  | 7.61 | 3.91 | 2.3  | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 | 2.04 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.75   | 1.56 | 0.55 | 1.09 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 |

ตารางที่ 36 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ได้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 36.97  | 8.23  | 6.99  | 6.60 | 6.21 | 6.21 | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| 2                    | 41.94  | 15.59 | 9.29  | 7.92 | 7.02 | 6.59 | 6.59 | 6.59 | 6.59 | 6.59 | 6.59 |
| 3                    | 38.81  | 9.90  | 7.41  | 6.22 | 5.74 | 4.95 | 4.36 | 4.36 | 4.36 | 4.36 | 4.36 |
| 4                    | 36.91  | 11.76 | 10.00 | 9.61 | 9.22 | 8.43 | 8.43 | 8.43 | 8.43 | 8.43 | 8.43 |
| 5                    | 34.89  | 11.37 | 10.89 | 8.12 | 7.92 | 6.93 | 6.93 | 6.93 | 6.93 | 6.93 | 6.93 |
| ค่าเฉลี่ย            | 37.90  | 11.37 | 8.92  | 7.69 | 7.22 | 6.62 | 6.43 | 6.43 | 6.43 | 6.43 | 6.43 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 2.65   | 2.74  | 1.67  | 1.35 | 1.39 | 1.26 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |

ตารางที่ 37 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ได้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 30.86  | 7.97  | 5.44 | 5.73 | 5.73 | 5.19 | 4.47 | 4.47 | 4.47 | 4.47 | 4.47 |
| 2                    | 37.84  | 11.04 | 9.83 | 8.66 | 6.03 | 4.95 | 4.85 | 4.85 | 4.85 | 4.85 | 4.85 |
| 3                    | 35.59  | 6.70  | 4.05 | 4.76 | 4.76 | 3.92 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.45 |
| 4                    | 39.13  | 13.77 | 8.20 | 8.69 | 8.46 | 7.83 | 6.43 | 6.43 | 6.43 | 6.43 | 6.43 |
| 5                    | 38.77  | 11.23 | 8.46 | 7.14 | 6.62 | 5.85 | 5.54 | 5.54 | 5.54 | 5.54 | 5.54 |
| ค่าเฉลี่ย            | 36.44  | 10.14 | 7.19 | 6.99 | 6.3  | 5.55 | 4.75 | 4.75 | 4.75 | 4.75 | 4.75 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 3.41   | 2.82  | 2.37 | 1.75 | 1.37 | 1.45 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |

ตารางที่ 38 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 34.03  | 9.17  | 5.62 | 3.32 | 2.23 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 |
| 2                    | 34.45  | 8.89  | 4.98 | 3.75 | 2.66 | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.09 |
| 3                    | 37.58  | 8.70  | 6.79 | 5.49 | 4.62 | 4.05 | 4.05 | 4.05 | 4.05 | 4.05 | 4.05 |
| 4                    | 34.89  | 7.72  | 5.70 | 4.53 | 4.36 | 2.99 | 2.99 | 2.99 | 2.99 | 2.99 | 2.99 |
| 5                    | 34.07  | 10.17 | 6.10 | 4.75 | 3.97 | 3.39 | 3.39 | 3.39 | 3.39 | 3.39 | 3.39 |
| ค่าเฉลี่ย            | 35.00  | 8.93  | 5.84 | 4.37 | 3.57 | 2.84 | 2.84 | 2.84 | 2.84 | 2.84 | 2.84 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 1.48   | 0.88  | 0.67 | 0.85 | 1.06 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.97 |

ตารางที่ 39 ค่า %Compression Set ของโฟม LDPE ที่ได้ผงเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 3%โดยน้ำหนัก

| ตัวอย่าง             | ค่า %Compression Set ที่เวลาต่าง ๆ กัน (ชม.) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | 0  | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 8    | 10   | 15   | 23   | 24   |
| 1                    | 33.02  | 7.51  | 3.98 | 3.54 | 3.13 | 2.46 | 2.46 | 2.46 | 2.46 | 2.46 | 2.46 |
| 2                    | 33.06  | 6.88  | 2.55 | 2.15 | 1.88 | 1.22 | 1.22 | 1.22 | 1.22 | 1.22 | 1.22 |
| 3                    | 36.36  | 10.6  | 7.61 | 5.02 | 3.75 | 3.75 | 3.75 | 3.75 | 3.75 | 3.75 | 3.75 |
| 4                    | 34.45  | 6.74  | 3.75 | 2.99 | 2.26 | 1.83 | 1.83 | 1.83 | 1.83 | 1.83 | 1.83 |
| 5                    | 35.29  | 11.60 | 8.67 | 5.65 | 4.72 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 |
| ค่าเฉลี่ย            | 34.44  | 8.67  | 5.31 | 3.87 | 3.15 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 1.44   | 2.27  | 2.66 | 1.44 | 1.14 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.26 |

ตารางที่ 40 ค่าความทนแรงกดของโฟมแต่ละตัวอย่าง (กิโลพาสคาล)

| ตัวอย่าง  | 1     | 2     | 3     | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|-----------|-------|-------|-------|-----------|----------------------|
| LDPE Foam | 77    | 76.76 | 70.56 | 74.77     | 4.14                 |
| LDPE/CT1  | 60.97 | 47.54 | 50.78 | 54.49     | 6.19                 |
| LDPE/CT2  | 40.85 | 43.00 | 43.03 | 43.64     | 1.12                 |
| LDPE/CT3  | 34.11 | 35.80 | 30.59 | 34.84     | 2.76                 |
| LDPE/HCT3 | 26.99 | 32.65 | 30.06 | 30.69     | 2.89                 |
| LDPE/CR1  | 61.39 | 55.54 | 54.42 | 57.12     | 3.93                 |
| LDPE/CR2  | 45.62 | 40.50 | 50.28 | 46.61     | 4.14                 |
| LDPE/CR3  | 39.82 | 38.07 | 43.56 | 40.99     | 2.23                 |
| LDPE/HCR3 | 33.26 | 34.64 | 35.48 | 34.77     | 1.12                 |

ตารางที่ 41 ค่า gas contribution (G. C.) และ polymer contribution (P. C.) ของ โฟมแต่ละตัวอย่างที่คำนวณด้วยสมการของ Zhang และ Ashby

| ตัวอย่าง  |       | ค่าความคืบ (Compressive Strain) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
|-----------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|           |       | 0.5                             | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 4.0   | 4.5   | 5.0   | 5.5   | 6.0    | 6.5    |
| LDPE      | G. C. | 2.23                            | 4.56  | 6.99  | 9.55  | 12.23 | 15.04 | 17.98 | 21.09 | 24.36 | 27.81 | 31.46 | 35.32  | 39.40  |
|           | P. C. | 1.50                            | 2.46  | 3.07  | 1.36  | 5.21  | 8.55  | 15.96 | 21.04 | 23.20 | 26.98 | 28.61 | 29.31  | 29.04  |
| LDPE/CT1  | G. C. | 2.23                            | 4.55  | 6.98  | 9.53  | 12.19 | 15.00 | 17.94 | 20.04 | 24.29 | 27.74 | 31.37 | 35.21  | 39.29  |
|           | P. C. | 1.17                            | 1.89  | 2.61  | 3.34  | 3.29  | 4.25  | 4.36  | 5.05  | 6.80  | 9.19  | 10.85 | 11.38  | 11.15  |
| LDPE/CT2  | G. C. | 2.22                            | 4.54  | 6.97  | 9.51  | 12.18 | 14.97 | 17.90 | 20.99 | 24.25 | 27.68 | 31.30 | 35.14  | 39.19  |
|           | P. C. | 1.09                            | 10.7  | 1.42  | 20.5  | 3.86  | 4.11  | 5.49  | 6.53  | 6.86  | 6.14  | 5.03  | 2.85   | 1.43   |
| LDPE/CT3  | G. C. | 2.22                            | 4.54  | 6.97  | 9.51  | 12.17 | 14.96 | 17.89 | 20.98 | 24.23 | 27.66 | 31.28 | 35.11  | 39.17  |
|           | P. C. | -1.33                           | -2.69 | -4.64 | -5.93 | -7.34 | -8.16 | -8.75 | -7.88 | -6.67 | -6.14 | -6.61 | -6.43  | -6.96  |
| LDPE/HCT3 | G. C. | 2.22                            | 4.53  | 6.95  | 9.49  | 12.15 | 14.93 | 17.86 | 20.34 | 24.18 | 27.60 | 31.21 | 35.03  | 39.08  |
|           | P. C. | -1.30                           | -2.88 | -3.66 | -4.39 | -4.13 | -3.81 | -3.46 | -3.73 | -5.00 | -6.57 | -8.02 | -10.18 | -12.54 |
| LDPE/CR1  | G. C. | 2.23                            | 4.56  | 6.99  | 9.54  | 12.21 | 15.02 | 17.96 | 21.06 | 24.33 | 27.77 | 31.41 | 35.26  | 39.34  |
|           | P. C. | 1.29                            | 2.34  | 4.00  | 5.61  | 10.24 | 14.03 | 15.74 | 16.72 | 16.30 | 15.71 | 14.39 | 13.21  | 11.63  |
| LDPE/CR2  | G. C. | 2.23                            | 4.55  | 6.98  | 9.53  | 12.19 | 14.98 | 17.94 | 21.03 | 24.29 | 27.73 | 31.36 | 35.19  | 39.27  |
|           | P. C. | 0.37                            | 0.95  | 1.21  | 1.08  | 1.02  | 1.97  | 3.71  | 5.33  | 6.32  | 6.41  | 5.86  | 5.47   | 4.53   |



ตารางที่ 41 ค่า gas contribution (G. C.) และ polymer contribution (P. C.) ของ โฟมแต่ละตัวอย่างที่คำนวณด้วยสมการของ Zhang และ Ashby (ต่อ)

| ตัวอย่าง  |       | ค่าความคืบ (Compressive Strain) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |       | 0.5                             | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 4.0   | 4.5   | 5.0   | 5.5   | 6.0   | 6.5   |
| LDPE/CR3  | G. C. | 2.22                            | 4.54  | 6.97  | 9.51  | 12.17 | 14.97 | 17.90 | 20.99 | 24.24 | 27.67 | 31.29 | 35.12 | 39.18 |
|           | P. C. | -1.86                           | -3.95 | -5.13 | -5.73 | -5.61 | -3.62 | -1.33 | -0.99 | -0.62 | -1.16 | -1.33 | -2.25 | -4.17 |
| LDPE/HCR3 | G. C. | 2.22                            | 4.54  | 6.97  | 9.51  | 12.17 | 14.96 | 17.89 | 20.98 | 24.23 | 27.65 | 31.27 | 35.10 | 39.16 |
|           | P. C. | -1.15                           | -3.47 | -2.37 | -1.77 | -1.35 | -0.55 | -1.09 | -1.78 | -2.35 | -2.59 | -4.56 | -5.55 | -7.79 |

ตารางที่ 42 ค่าความทนแรงดึงของโฟมแต่ละตัวอย่าง (กิโลพาสคาล)

| ตัวอย่าง  | 1      | 2      | 3      | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|-----------|--------|--------|--------|-----------|----------------------|
| LDPE Foam | 0.3368 | 0.3429 | 0.4398 | 0.3731    | 0.0577               |
| LDPE/CT1  | 0.2372 | 0.2017 | 0.1720 | 0.2036    | 0.0326               |
| LDPE/CT2  | 0.1605 | 0.2083 | 0.157  | 0.1753    | 0.0287               |
| LDPE/CT3  | 0.1144 | 0.1203 | 0.1418 | 0.1255    | 0.0144               |
| LDPE/HCT3 | 0.1198 | 0.1016 | 0.0998 | 0.1070    | 0.0111               |
| LDPE/CR1  | 0.2872 | 0.3019 | 0.263  | 0.2840    | 0.0196               |
| LDPE/CR2  | 0.1844 | 0.1660 | 0.2033 | 0.1846    | 0.0187               |
| LDPE/CR3  | 0.1926 | 0.1293 | 0.2016 | 0.1745    | 0.0394               |
| LDPE/HCR3 | 0.127  | 0.1019 | 0.1454 | 0.1248    | 0.0218               |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัชรินทร์ แซ่หลาย เกิดเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาค วิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2540 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นการศึกษา 2541 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นของปีการศึกษาของปีการศึกษา 2544 รวมระยะเวลาในการศึกษา 3.5 ปี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย