

ท่อน้ำซึมจาก GRT/HDPE : สมบัติการไหลและการซึมน้ำ



เลขที่.....
เลขทะเบียน 49289
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

**Porous Pipe from GRT/HDPE : Rheological Property
and Water Irrigation**



Miss Phadutsadee Pongpimai

Miss Pattaraporn Inthakate

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ท่อน้ำซึมจาก GRT/HDPE : สมบัติการไหลและการซึมผ่าน

นักศึกษา นางสาวฟ้าคุณธิ พงษ์พิมาย รหัส 42050099

 นางสาวภัทรพร อินทเกษ รหัส 42050100

ภาควิชา เคมี


สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม


ปีการศึกษา 2545

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.ภัทรวรุฑ	มนต์วิเศษ	
กรรมการ	ดร.ชลลดา	ฤทธิวิรุฬห์	
กรรมการ	ผศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	
กรรมการ	ดร.สุภารัตน์	รักชลธิ	


 (รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)
 หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ท่อน้ำซึมจาก GRT/HDPE : สมบัติการไหลและการซึมน้ำ		
นักศึกษา	นางสาวฟ้าคุณฎี พงษ์พิมาย	รหัสนี้	42050099
	นางสาวภัทรพร อินทเกษ	รหัสนี้	42050100
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2545		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติการซึมน้ำของวัสดุผสมผงขยารรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (GRT/HDPE) สำหรับใช้ในการผลิตท่อน้ำซึม (Porous pipe) โดยมีเอโซไคคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง เติมสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) และสารเชื่อมโยงโคลิควิมิตเปอร์ออกไซด์ (DCP) งานวิจัยนี้ทำการศึกษา HDPE 2 ชนิด คือ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE เกรดใช้มากกลางแจ้งที่มีการผสมเข้ามาค่า 2-3% ผสม GRT/HDPE เท่ากับ 60/40 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ที่อุณหภูมิหัวคาย 180 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการศึกษาสมบัติการไหลของของผลด้วยลำโพงคาลอริมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และทำการเตรียมท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) ใช้หัวคายชนิดท่อ จากการศึกษาศสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมน้ำของท่อน้ำซึม พบว่าเมื่อเติมสารให้ฟอง AZ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสลดลง ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารช่วยผสม PE-g-MA ลงไป พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และเมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP ลงไป ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสและร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาผลของความยาวท่อที่มีต่อสมบัติการซึมน้ำและความดันลดสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวท่อจาก 30-150 cm น้ำที่ซึมออกมาในแต่ละช่วงความยาวท่อ (30 cm) มีปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเพิ่มความดันน้ำที่ใช้ (0.2-0.6 บาร์) ปริมาณน้ำที่ซึมออกมาเพิ่มขึ้นในทุกช่วงความยาวของท่อและไม่ได้แตกต่างกัน และความดันในแต่ละช่วงเมื่อมีการเพิ่มความยาวของท่อมีค่าใกล้เคียงกันหรือความดันลด (Pressure drop) มีค่าน้อยมาก โดยสูตร HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ปริมาณน้ำที่ซึมออกมาสูงที่สุด จากงานวิจัยพบว่าถ้าใช้ความดันน้ำในช่วง 0.2-0.6 บาร์ จะได้อัตราการซึมของน้ำในช่วง 0.22-1.27 l/hr.cm² จากการศึกษาลักษณะวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี ท่อน้ำซึมมีลักษณะรูพรุนเป็นเซลล์เปิด (Open cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Porous Pipe from GRT/HDPE : Rheological Property and Water Irrigation
Student Names	Miss Phadutsadee Pongpimai Miss Pattaraporn Inthakate
Department	Chemistry
Faculty	Science
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2002
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Special Project Co-advisor	Dr. Suparat Rukchonlatee

ABSTRACT

This research work was focused on rheological property and water irrigation of porous pipe made from ground rubber tire (GRT) and high density polyethylene (HDPE). Effects of other additives were studied including blowing agent (AZ), compatibilizer (PE-g-MA) and crosslinking agent (DCP). Two HDPEs were used in this study, i.e., pure HDPE and HDPE with 2-3% carbon black (c-HDPE) (for outdoor application). Mixtures of GRT/HDPE (60/40 by weight) were mixed in a single screw extruder at a die temperature of 180 °C. Then, the mixture were studied for rheological property by using a capillary rheometer at 190 °C. The porous pipe was shaped by extrusion technique with a tube die in order to study mechanical and water irrigation properties. It was found that tensile strength and modulus were decreased as the AZ was put in, however; % elongation at break (% EB) was increased. When the PE-g-MA was added, tensile strength and modulus were enhanced, but % EB was decreased. When the DCP was incorporated, tensile strength, modulus and % EB were improved. In the study of effects of pipe length on the water irrigation and pressure drop for agricultural applications, as the pipe length was increased from 30 to 150 cm, irrigating water in each section (30 cm) was found in the similar amount. When the water pressure was increased (0.2 to 0.6 bar), the irrigating water was increased. With increasing the pipe length, the pressure drop in each section was found to be insignificantly changed. The porous pipe made from HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA had a maximum water irrigating rate. The water irrigating rate was found in the range of 0.22-1.27 l/hr.cm² for the water pressure of 0.2-0.6 bar. SEM micrographs revealed that GRT and HDPE had a good compatibility with open cell structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา เอาใจใส่ดูแล และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอพระขอบคุณ และ ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้อง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณบุญหาญ อุ่อคุมขิง และบริษัทแสวงไทยผลิตราย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ผงยางรถยนต์ (GRT) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท CCC Chemical Commerce Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดาใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบและคอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีพลาสติก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือให้การทำให้โครงการพิเศษนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยถามไถ่ ให้กำลังใจและคำปรึกษาที่ดีตลอดมา และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ

นางสาวฟ้าคุณุฎี พงษ์พิมาย

นางสาวภัทรพร อินทภาพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 สถานที่ทำการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	6
2.2 อีลาสโตเมอร์	10
2.3 ยางรถยนต์	11
2.3.1 ผงยางจากยางรถยนต์	12
2.3.2 การใช้ประโยชน์จากผงยางรถยนต์	14
2.4 โฟมและสารให้ฟอง	15
2.4.1 โฟม	15
2.4.2 สารให้ฟอง	15
2.5 สารช่วยผสม	17
2.5.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	17
2.6 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล	17
2.7 กระบวนการผลิตท่อ	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	28
3.4 การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ท่อ	28
3.5 การทดสอบ	29
3.5.1 การทดสอบสมบัติการไหล	29
3.5.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม	29
3.5.2.1 ความทนแรงกด	29
3.5.2.2 การทดสอบสมบัติแรงดึงยืด	31
3.5.3 การทดสอบสมบัติการซึมของน้ำ	32
3.5.3.1 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำต่อความยาวท่อ	32
3.5.3.2 การศึกษาความดันลดของท่อน้ำซึม	32
3.5.4 การทดสอบสมบัติทางสัญญาณวิทยา	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	34
4.1 การศึกษาสมบัติการไหล	34
4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม	37
4.2.1 ความทนแรงกด	37
4.2.2 สมบัติแรงดึงยืด	39
4.3 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำ	42
4.3.1 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำต่อความยาวท่อ	43
4.3.2 การศึกษาความดันลดของท่อน้ำซึม	49
4.4 การศึกษาสัญญาณวิทยา	51
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	1
รูปที่ 1.2	2
รูปที่ 1.3	3
รูปที่ 2.1	6
รูปที่ 2.2	7
รูปที่ 2.3	8
รูปที่ 2.4	8
รูปที่ 2.5	11
รูปที่ 2.6	12
รูปที่ 2.7	13
รูปที่ 2.8	14
รูปที่ 2.9	14
รูปที่ 2.10	17
รูปที่ 2.11	18
รูปที่ 2.12	19
รูปที่ 2.13	20
รูปที่ 2.14	20
รูปที่ 2.15	21
รูปที่ 2.16	21
รูปที่ 2.17	22
รูปที่ 2.18	22
รูปที่ 3.1	30
รูปที่ 3.2	32
รูปที่ 4.1	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ Shear rate ของ HDPE และ c-HDPE ที่มีการเติม GRT และ Additive ต่างๆ ลงไป	35
รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ Shear rate ของ HDPE และ c-HDPE ที่มีการเติม GRT และ Additive ต่างๆ ลงไป	35
รูปที่ 4.4	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกดและเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี HDPE เป็นเมตริกซ์	37
รูปที่ 4.5	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกดและเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี c-HDPE เป็นเมตริกซ์	38
รูปที่ 4.6	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของท่อน้ำซึมสูตรต่างๆ	39
รูปที่ 4.7	ค่ามอดุลัส (modulus) ของท่อน้ำซึมสูตรต่างๆ	40
รูปที่ 4.8	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของท่อน้ำซึมสูตรต่างๆ	41
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ และ c- HDPE/GRT/AZ ที่ความดันต่างๆ	43
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA และ c- HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความดันต่างๆ	44
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/CDP และ c- HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความดันต่างๆ	45
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP และ c- HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความดันต่างๆ	46
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของสูตรผสมที่มี HDPE เป็นเมตริกซ์ ที่ความดัน 0.4 bar	47
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของสูตรผสมที่มี c-HDPE เป็นเมตริกซ์ ที่ความดัน 0.4 bar	48
รูปที่ 4.15	SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิค่าที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์	51
รูปที่ 4.16	SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิค่าที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบระบบการให้น้ำแบบต่างๆ	4
ตารางที่ 2.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	10
ตารางที่ 2.3 สารให้ฟองทางเคมีที่ใช้ในการค้า	16
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	26
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารให้ฟอง AZ	27
ตารางที่ 3.3 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง	28
ตารางที่ 3.4 แรงกดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 746-2530	30
ตารางที่ 4.1 ค่า Power law index (n) ของสูตรผสม	36
ตารางที่ 4.2 ค่าความดันของทุกสูตรผสมที่ความยาวท่อต่างๆ ที่ความดัน 0.2 bar	49
ตารางที่ 4.3 ค่าความดันของทุกสูตรผสมที่ความยาวท่อต่างๆ ที่ความดัน 0.4 bar	50
ตารางที่ 4.4 ค่าความดันของทุกสูตรผสมที่ความยาวท่อต่างๆ ที่ความดัน 0.6 bar	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตแปรรูปได้ง่ายและมีความสำคัญในชีวิตประจำวัน เช่น ใช้ทำภาชนะ เครื่องใช้ภายในครัวเรือน เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ประตูและหน้าต่าง ยางรถยนต์ พื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ประชากรโลกมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุให้ปริมาณขยะพอลิเมอร์มีมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ย่อยสลายโดยธรรมชาติได้ยากและใช้เวลานาน จึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นทุกวัน

ยางรถยนต์ (Tires) เป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณการใช้อย่างมาก เนื่องจากปริมาณการใช้รถยนต์ในประเทศไทยมีจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณการใช้ยางรถยนต์มีเพิ่มขึ้นด้วย ยางรถยนต์มีอายุการใช้งานที่จำกัดเพียงระยะเวลาหนึ่งก็จะเกิดการเสื่อมสภาพทำให้ขยะยางรถยนต์มีเพิ่มมากขึ้น ในการกำจัดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุดเป็นสิ่งสำคัญ



รูปที่ 1.1 ยางรถยนต์ที่ไม่ใช้แล้ว [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดขยะพอลิเมอร์ที่ไม่ถูกวิธีย่อมก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การกำจัดขยะพอลิเมอร์โดยวิธีการฝังกลบจะใช้เงินลงทุนสูงเพราะต้องใช้น้ำหนักในการฝังกลบมากเนื่องจากมีปริมาณมากและใช้เวลานานในการย่อยสลาย นอกจากนี้การฝังกลบยังทำให้เกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน และเป็นการสูญเสียวัสดุพอลิเมอร์ไปโดยเปล่าประโยชน์ การกำจัดขยะพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วโดยการนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) จึงเป็นแนวทางที่สามารถแก้ไขปัญหามลพิษพอลิเมอร์ที่ได้ผล โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

การกำจัดยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยการนำมาบดเป็นผงยางรถยนต์ (Ground rubber tires, GRT) เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ทำได้ดังนี้ [2]

1. นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งค่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังรูปที่ 1.2 แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศและมีการลงทุนที่สูง



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับค่าพลังงานที่ได้ [2]

- นำมาสวมกับยางมะตอย (Asphalt) เพื่อใช้ราดถนน โดยจะเพิ่มความสามารถในการรับแรงของพื้นถนนได้
- นำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) โดยจะสามารถลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติบางประการได้ เช่น สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีการนำพอลิเมอร์มาใช้ในด้านเกษตรกรรม เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม นี่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพาะปลูกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตัดไม้ทำลายป่าซึ่งทำให้ป่าต้นน้ำถูกทำลาย ปริมาณน้ำฝนลดลง ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เช่น เอลนีโน และการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างไม่คุ้มค่า ปริมาณน้ำจึงไม่เพียงพอสำหรับการเกษตรในบางฤดูกาล

ปัจจุบันการให้น้ำแก่พืชผลทางการเกษตรทำได้หลายวิธี เช่น การปล่อยให้น้ำไหลท่วมเป็นผืนยาว (Border) การให้น้ำแบบร่อง (Furrow) การให้น้ำแบบหยด (Trickle irrigation) และการฉีดฝอยหรือการใช้ระบบหัวเหวี่ยง (Sprinkler) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในขณะนี้ โดยระบบนี้เป็นระบบที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำบางส่วนไปโดยเปล่าประโยชน์และไม่สามารถให้น้ำแก่พืชเฉพาะจุดได้

โครงการพิเศษนี้นำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาขยะพอลิเมอร์และปัญหาการขาดแคลนน้ำ โดยการผลิตท่อน้ำซึม (Porous pipe) เพื่อใช้ในการให้น้ำแบบประหยัดและสามารถให้น้ำแก่พืชได้เฉพาะจุดโดยกำหนดขอบเขตการให้น้ำได้ ทำให้พืชสามารถดูดน้ำได้มากที่สุดแต่ใช้ปริมาณน้ำน้อย ซึ่งส่วนประกอบหลักจะใช้ผงยางจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์ (Matrix) ที่เชื่อมโยงอนุภาคผงยางเข้าด้วยกัน โดยมีเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent) ทำให้ท่อที่ได้มีรูพรุน ซึ่งเป็นรูพรุนที่ต่อเนื่องกัน (Open cell) ทำให้น้ำไหลซึมออกมาได้ แสดงดังรูปที่ 1.3 เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางด้านเกษตรกรรมที่มีประสิทธิภาพ โดยวางเป็นวงบริเวณรากฝอยของต้นไม้ วางตามยาวแนวผักสวนครัว และยังสามารถลดปริมาณการสูญเสียน้ำได้มากกว่าการให้น้ำชนิดอื่น ดังตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.3 ภาพแสดงลักษณะท่อน้ำซึมและการไหลของน้ำ [1]

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบระบบการให้น้ำแบบต่าง ๆ [3]

สมบัติ	สายยาง	น้ำพุ่ง	พ่นฝอย	น้ำหยด	หัวเหวี่ยง
ขนาดของช่องน้ำออก (mm)	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	0.8 -2.3	0.1-2.0	4.0-5.0
อัตราการไหลของน้ำ (l / hr)	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	450-500	1-20	450-500
เส้นผ่านศูนย์กลางของน้ำที่ออกจากระบบให้น้ำ (mm)	ไม่แน่นอน	เป็นจุดที่น้ำตก	1-4	เป็นจุด	3-10
ประสิทธิภาพของระบบการให้น้ำ (%)	50-80	50-70	80-95	95-100	60-70
ระบบปลูกพืช	สามารถใช้ได้กับทุกระบบการปลูกพืช	ปลูกในระยะปกติที่ปลูกเป็นแนว	ปลูกในระยะปกติที่ปลูกเป็นแนว	ปลูกเป็นแถวระยะห่างจากต้นไม่ห่างกันมากนัก	ปลูกในระยะปกติที่ปลูกเป็นแนว

โครงการพิเศษนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544 เรื่อง " การปรับปรุงสมบัติของน้ำซึมจากผองยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น " [4] และวิทยานิพนธ์สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544 เรื่อง " การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผองยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว " [5] โดยในงานวิจัยนี้เน้นที่จะศึกษาถึงสมบัติบางประการโดยเฉพาะสมบัติการไหล (Rheological property) ของผสมวัสดุคิปี ได้แก่ GRT และพอลิเมอร์ตัวเชื่อม HDPE โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อถึงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene grafted maleic anhydride, HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรระหว่าง HDPE และ GRT ที่มีสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ คือ สารให้ฟอง สารช่วยผสม สารเชื่อมโยง และศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ HDPE ผสมกับ GRT โดยมีการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ ดังนี้
 - สารให้ฟอง (Blowing agent) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ)
 - สารช่วยผสม (Compatibilizer) PE-g-MA
 - สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP)
2. ศึกษาเปรียบเทียบท่อน้ำซึมที่ผลิตได้จาก HDPE และ HDPE ที่มีการเติมเขม่าดำ (Carbon black)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (GRT) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนน้ำ และต้นทุนของผลผลิตทางการเกษตร
2. ลดขยะพอลิเมอร์ประเภทยางรถยนต์ซึ่งย่อยสลายโดยธรรมชาติได้ยาก โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

1. อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ห้องปฏิบัติการ Scanning Electron Microscopy (SEM) อาคารจุฬารัตนวลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ศูนย์เทคโนโลยีพลาสติก สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

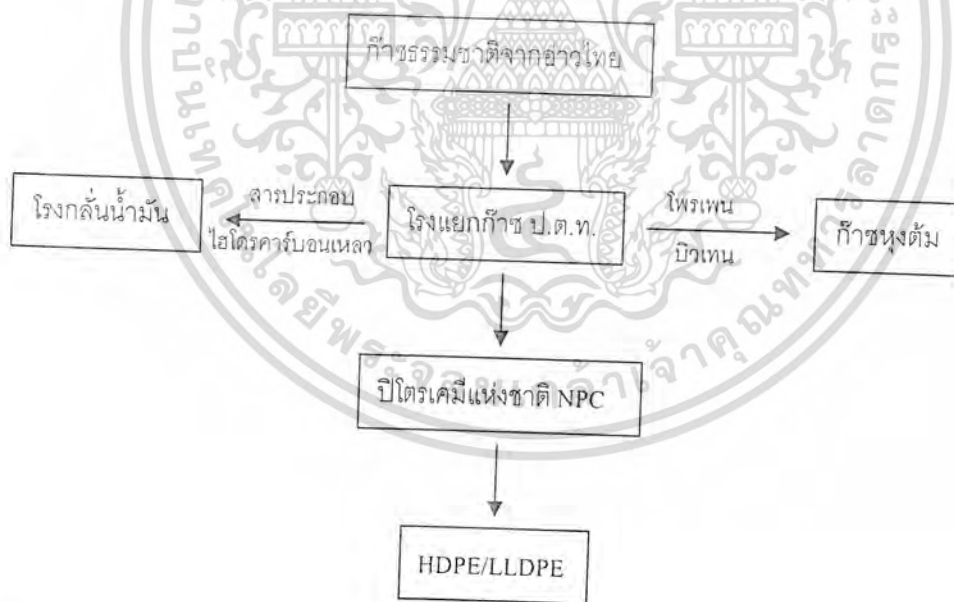
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [6]

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น ถังใส่อาหาร เครื่องใช้ในครัวเรือน ขวดภาชนะ ของเล่น เป็นต้น

โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเป็นดังนี้



พอลิเอทิลีนเกิดจากการที่นำเอทิลีนมอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารตั้งต้นคือ เอทิลีนที่ได้จากอีเทน ซึ่งสารพวกนี้ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แผนผังการผลิตพอลิเอทิลีนเริ่มจากก๊าซธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังการส่งวัตถุดิบในการผลิตพอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน

กระบวนการผลิตที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ที่แตกต่างกัน จะให้โครงสร้างของพอลิเอทิลีนต่างกัน และจากโครงสร้างที่ต่างกันจะทำให้สมบัติของพอลิเอทิลีนในแต่ละกระบวนการผลิตแตกต่างกันไปด้วย สำหรับกระบวนการพอลิเมอไรเซชันพอลิเอทิลีน สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน

กระบวนการผลิต	ความดัน (atm)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	พัฒนาโดย
แบบความดันสูง	1,000-2,000	200-300	ไอซีไอ (ICI)
แบบความดันปานกลาง	30-40	100-150	ฟิลลิปส์
แบบความดันปานกลาง	30-70	230-270	สแตนคาร์คอบอลต์
แบบความดันต่ำ	1-10	50-100	Dr.Karl Ziegler

2.1.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน

- กระบวนการผลิตแบบความดันสูง (ICI process) จะให้โครงสร้างที่เป็นกิ่งที่ยาวและมีจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจากการผลิตด้วยกระบวนการแบบความดันสูง

- กระบวนการผลิตแบบความดันปานกลาง จะให้โครงสร้างแบบกิ่งปานกลาง ดังรูปที่

2.3 มี 2 กระบวนการ คือ

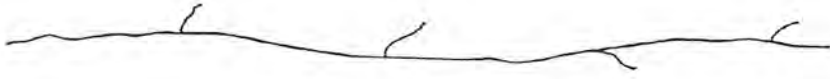
1. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ที่อยู่บนซิลิกาหรืออะลูมิเนียมเป็นตัวเร่งในตัวกลางเจือย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำและกระบวนการซีเกลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์บนอะลูมินา ไททาเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียมได-



ออกไซด์

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจากการผลิตด้วยกระบวนการแบบความดันปานกลาง

• กระบวนการผลิตแบบความดันต่ำ (Ziegler process) จะให้โครงสร้างแบบเส้นตรง แต่สามารถให้เกิดกิ่งเล็กๆ ได้โดยใช้โคมอนอเมอร์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจากการผลิตด้วยกระบวนการแบบความดันต่ำ

กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีเกลอร์-แนตดา ที่ใช้ทั่วไปได้แก่ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ อะลูมิเนียมอัลคิล ทำในตัวกลางเฉื่อย เช่น เฮกเซน หรือ โทลูอีน และในบรรยากาศไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์จะตกตะกอนออกมาซึ่งต่างจากพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการใช้ความดันสูงมาก คือ มีกิ่งบ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในการแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนจะใช้มาตรฐาน ASTM D1248 ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 4 ประการ คือ ชนิด (Types) ชั้น (Classes) ลำดับย่อย (Categories) เกรด (Grades) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ชนิด (Types)

การแบ่งประเภทพอลิเอทิลีนเป็นตัวบ่งชี้ตัวแรกจะใช้ค่าของความหนาแน่น เนื่องจากเป็นค่าที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง ความใส การทนแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM สามารถแบ่งประเภทของความหนาแน่นได้ 4 ประเภท ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด (Types)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
Low density polyethylene	0.910-0.925
Medium density polyethylene	0.926-0.940
High density polyethylene	0.941-0.959
High density polyethylene	0.960

หมายเหตุ การวัดความหนาแน่นเม็ดพลาสติกต้องปราศจากสีและสารเติมแต่ง

2. ชั้น (Classes)

การแบ่งชั้นจะอาศัยส่วนประกอบของเม็ดพลาสติกและการใช้งาน การจัดชั้นมี 3 ชั้น ดังนี้

ชั้น A (Class A) จะเป็นสีธรรมชาติของเม็ดพลาสติก ใช้ในงานทั่วไปและในงานที่ต้องการความเป็นฉนวนไฟฟ้า สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidant) และสารเติมแต่งชนิดอื่นๆจะมีหรือไม่มีขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อ

ชั้น B (Class B) เติมสีขาวและดำ การใช้งานจะใช้ในงานทั่วไปและงานที่ต้องการความเป็นฉนวนไฟฟ้า สารป้องกันการเสื่อมสภาพและสารเติมแต่งขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อ

ชั้น C (Class C) จะเติมสีดำ (Carbon black) ไม่น้อยกว่า 2 % โดยขนาดอนุภาคของเม็ดสีดำจะต้องน้อยกว่า 20 นาโนเมตร การใช้งานจะใช้ในงานที่ต้องการความคงทนจากสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนสารเติมแต่ง สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อ

3. ลำดับย่อย (Categories)

จากชั้นทั้ง 3 สามารถแบ่งเป็นลำดับชั้นย่อยได้ตามดัชนีการไหล ดังนี้

ลำดับชั้นย่อย	ดัชนีการไหล g/10 min (190 °C , 2.16 kg)
1	> 25
2	>10-25
3	>1.0-10
4	>0.4-1.0
5	0.4 สูงสุด

4. เกรด (Grades)

เป็นการระบุรายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจจะมีภาระระบุไว้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของ HDPE และการนำไปใช้ประโยชน์

HDPE มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง มีโซ่กิ่งน้อยมาก สายโซ่มีความเป็นระเบียบสูงจึงมีความเป็นผลึกสูงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานต่อสารเคมีสูง เป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลางถึงสูงจะมีสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก

ตารางที่ 2.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

สมบัติ	หน่วย	ค่า
ดัชนีการไหลที่ 2.16 kg 190 °C	g/10 min	0.05-1
ความหนาแน่น	g/cm ³	0.95-0.98
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	MPa	25-35
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	>500
จุดหลอมเหลว	°C	131-135

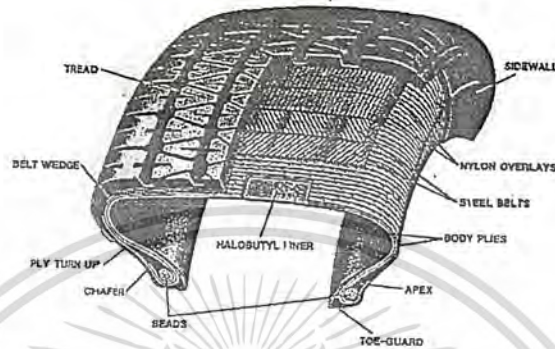
2.2 อีลาสโตเมอร์ [7]

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) หรือ ยาง (Rubbers) คือ วัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่าเมื่อทำการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง ปัจจุบันมีการบริโภคยางทั่วโลกในปริมาณมาก (มากกว่า 24 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2545) และยังมีอัตราการใช้ยางที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (มากกว่า 5% ต่อปี) จึงนับได้ว่ายางเป็นวัสดุที่มีความสำคัญยิ่งชนิดหนึ่งของโลก อุตสาหกรรมหลักที่สำคัญที่สุดของยางคือยางรถยนต์ (มากกว่า 60%) นอกนั้นใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม และใช้ในครัวเรือน เช่น รองเท้ายาง (Footwear) ท่อยาง (Rubber hoses) ชิ้นส่วนรถยนต์ (Automobile parts) สายพานลำเลียง (Conveyor belts) ถุงมือยาง (Rubber gloves) ถุงยางอนามัย (Condoms) พื้นพรม (Carpet backing) ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (Latex foam) ยางยืด เป็นต้น การที่ยางเป็นวัสดุที่นิยมใช้และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก เนื่องจากยางมีสมบัติเด่นคือ มีสมบัติการยืดหด (Elastic) ยืดหยุ่น (Flexible) เหนียว (Tough) แข็งแรง มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ สามารถรับแรงดึงหรือแรงกดอัดได้อย่างมาก สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมากเมื่อได้รับแรง และกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง นอกจากนี้ยางบางชนิดยังมีสมบัติพิเศษ เช่น ทนน้ำมัน ทนอุณหภูมิสูง ทนตัวทำละลาย ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและหลากหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ยางรถยนต์ [8]

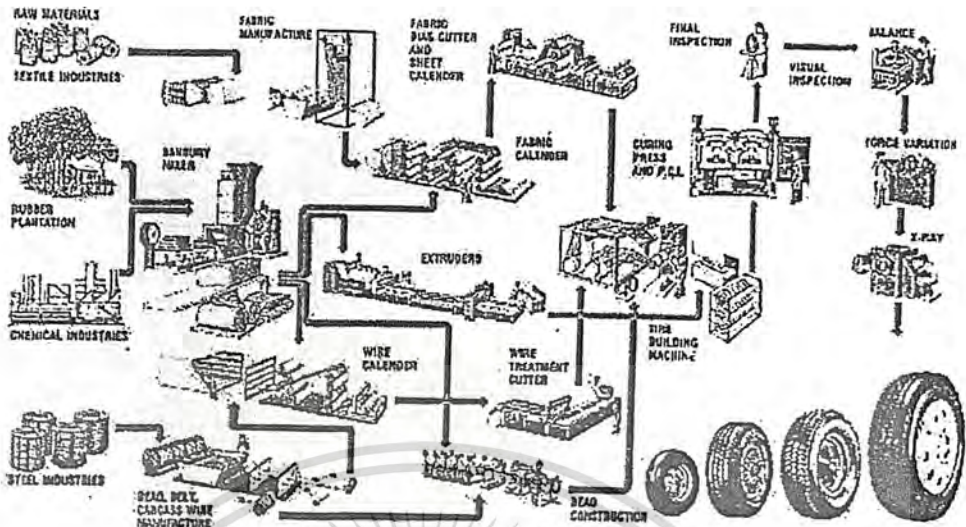
ยางรถยนต์ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาใช้ประโยชน์ในด้านการคมนาคมขนส่ง ซึ่ง Charles Goodyear ได้ค้นพบการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ที่สามารถผลิตล้อยางที่รับแรงและมีความทนทานสูง ตัวอย่างส่วนประกอบของยางรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของยางรถยนต์สำหรับรถยนต์ส่วนบุคคล [8]

- หน้ายาง (Tread) เป็นส่วนที่สัมผัสกับผิวถนนจึงต้องมีคุณสมบัติทนทานต่อการขัดสีระหว่างยางกับพื้นถนนสูง มีความร้อนสะสมต่ำ ส่วนนี้มักประกอบด้วยยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR)
- ยางใน (Liner) ทำหน้าที่รับน้ำหนัก ต้องการยางที่มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงเลือกใช้ยางบิวทิว (Butyl rubber, IIR)
- แก้มยาง (Sidewall) ต้องการยางที่มีคุณสมบัติการรับแรงกระแทกที่ดีซึ่งช่วยควบคุมการวิ่งของรถ แก้มยางประกอบด้วย NR, SBR และ BR ผสมกับเขม่าดำ น้ำมันต่างๆและสารประกอบอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตยางรถยนต์ [8]

2.3.1 พงยางรถยนต์ [1]

การนำยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ ในช่วงแรกนั้นจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านหินและน้ำมันในโรงงานต่างๆ เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ต่อมาได้มีการพัฒนาการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่โดยวิธีต่างๆ เช่น การนำมาหล่อคอกยางใหม่ การนำมาผสมในวัตถุดิบผลิตยางรถยนต์และนำมาเป็นสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์ต่างๆ เป็นต้น การนำยางรถยนต์เข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องลดขนาดของยางให้เป็นชิ้นเล็กๆก่อน การบดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

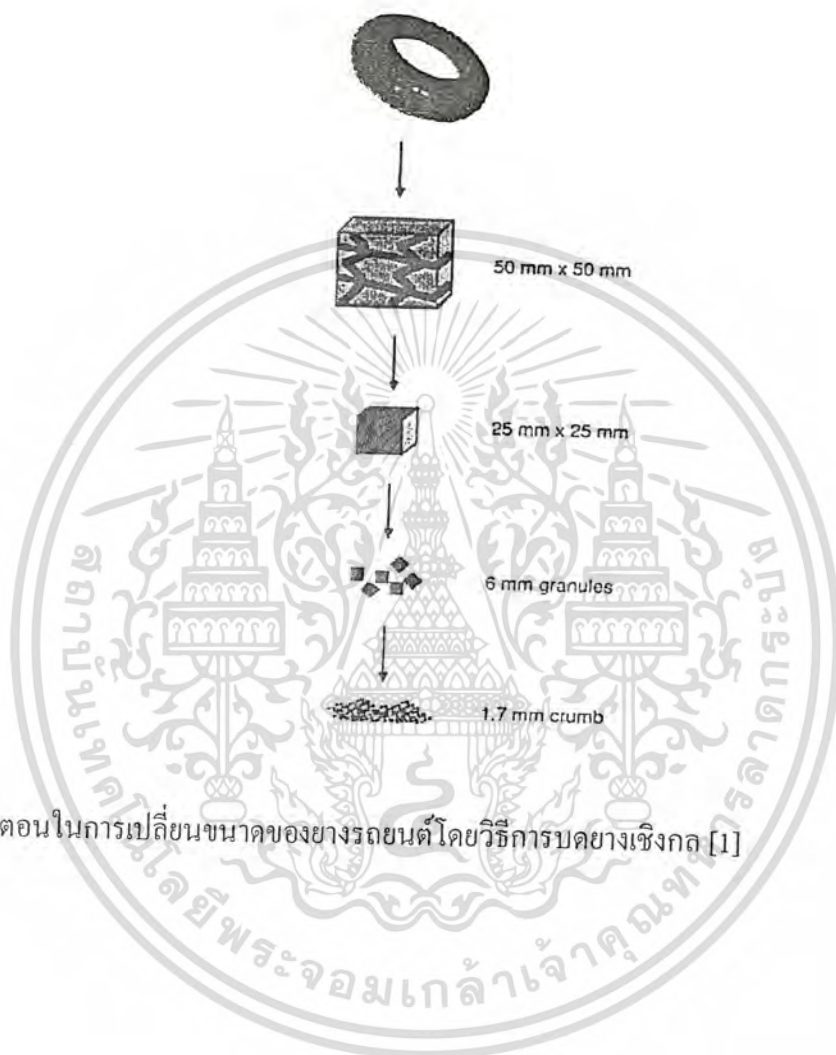
1. การบดเชิงกล (Mechanical grinding)

กระบวนการเปลี่ยนยางรถยนต์ให้เป็นพยางรถยนต์ (Ground rubber tires, GRT) โดยการบดยางรถยนต์ให้เป็นผงที่อุณหภูมิห้อง กระบวนการบดแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

ขั้นที่หนึ่ง การตัด (Shredding) ยางรถยนต์จะถูกตัดแยกออกตามองค์ประกอบของยาง จากนั้นจะตัดให้มีขนาด 50 mm X 50 mm ที่เรียกว่าเศษยางรถยนต์ และเศษยางรถยนต์เหล่านี้จะถูกบดให้มีขนาดน้อยกว่า 25 mm ส่วนโลหะที่ผสมอยู่ในเศษยางรถยนต์ถูกแยกออกโดยสายพานแม่เหล็กขณะลำเลียงเศษยางรถยนต์เข้าสู่ขั้นตอนการทำเม็ด

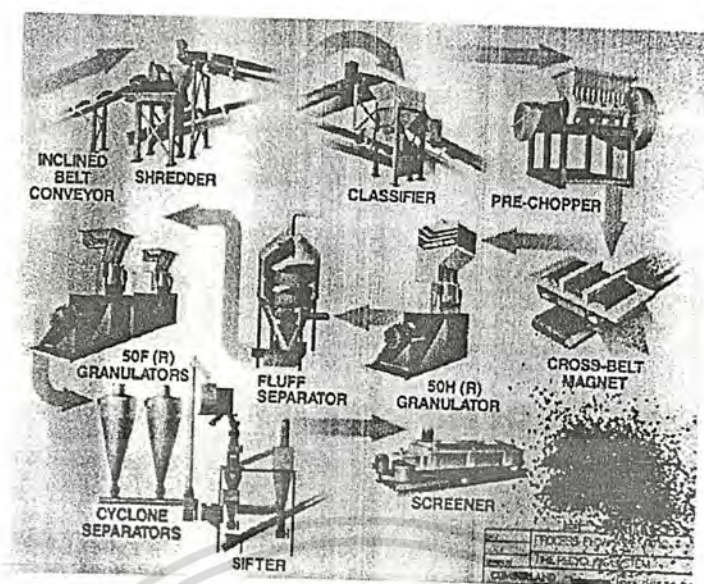
ขั้นที่สอง การแยก (Separation) ยางรถยนต์ที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จะมีเส้นใยปริมาณมากซึ่งต้องแยกออก ถ้าไม่แยกออกจะมีการปนเปื้อนอยู่ในผงยางรถยนต์ ทำให้พยางรถยนต์เกิดพันธะที่ไม่ต้องการกับสารตัวอื่นในระหว่างนำไปใช้งานเพราะเส้นใยเหล่านี้มีพื้นที่ผิวมาก ประกอบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขข้อนี้ ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่สาม การทำเม็ด (Granulation) ตัดเศษยางรถยนต์ให้มีขนาด 6 mm ด้วยใบมีดหมุนที่ออกแบบเป็นพิเศษ ส่วนโลหะและเส้นใยที่เหลืออยู่จะถูกแยกออกอีกครั้งโดยสายพานแม่เหล็ก และ Cyclonic fluff separator ตามลำดับ จากนั้นเศษยางรถยนต์จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องตัดเม็ดเพื่อตัดให้มีขนาดประมาณ 1.7 mm



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนในการเปลี่ยนขนาดของยางรถยนต์โดยวิธีการบดยางเชิงกล [1]

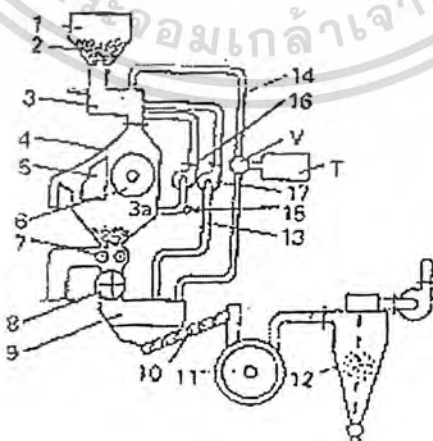
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กระบวนการบดขางรถยนต์ [1]

2. การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic rinding)

เป็นกระบวนการบดขางรถยนต์โดยการนำเศษขางรถยนต์แช่ในไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ -195°C แล้วจึงบดด้วย Hammer mill และทำการแยกโลหะและเส้นใยออกไปพร้อมๆกันด้วย ผงขางรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าผงขางรถยนต์ที่ได้จากการบดโดยวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งการบดโดยวิธีนี้ยังใช้พลังงานในการบดน้อยกว่าวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.9 เครื่องบดขางที่อุณหภูมิต่ำ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การใช้ประโยชน์จากผงยางรถยนต์

ผงยางรถยนต์ถูกใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในวัสดุคืบต่างๆ ได้แก่

1. ยางรถยนต์ ผงยางรถยนต์จะถูกผสมกับวัสดุคืบผลิตยางรถยนต์ ปริมาณผงยางรถยนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับ การนำยางรถยนต์ไปใช้งาน การเติมผงยางรถยนต์ในวัสดุคืบจะทำให้ความแข็งแรงลดลงส่วนความร้อนสะสมเพิ่มขึ้น
2. แผ่นปูพื้น ผลิตจากผงยางรถยนต์ผสมกับพอลิยูรีเทน ผงยางรถยนต์ที่ใช้ควรมีขนาดเล็กลงกว่า 4 เมช แผ่นปูพื้นที่ผลิตได้มีคุณสมบัติดูดซับเสียงและทนแรงกระแทกได้ดี
3. ผสมกับยางมะตอยเพื่อราดถนน การเติมผงยางรถยนต์ลงในยางมะตอยจะช่วยลดการแตกของผิวถนน เพิ่มการทนทานและลดการซึมผ่านของน้ำ

2.4 โฟมและสารให้ฟอง

2.4.1 โฟม (Foams)

โฟม คือวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ภายในเนื้อจะมีรูอากาศ ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ โฟมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามโครงสร้างของเซลล์ คือ

- โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ที่ไม่ต่อเนื่องกัน
- โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อเนื่องกัน ทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้

สำหรับโฟมที่มีทั้งเซลล์เปิดและปิดอยู่ด้วยกันเรียกว่า "โฟมแบบเซลล์ผสม" โฟมพลาสติกประกอบด้วย โครงสร้างของเซลล์ที่ได้จากการแทรกตัวของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของสารให้ฟอง

2.4.2 สารให้ฟอง [10]

สารให้ฟอง (Blowing agents) เป็นสารที่ให้ก๊าซและทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ สารให้ฟองแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการให้ฟองก๊าซคือ

1. สารให้ฟองทางกายภาพ (Physical blowing agent) เห็นสารให้ฟองที่ทำให้เกิดช่องว่างหรือเกิดก๊าซภายในพอลิเมอร์โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความดันและสถานะของสาร เช่น ของเหลวที่ถูกทำให้ระเหยกลายเป็นก๊าซแทรกตัวเข้าไปในพอลิเมอร์ภายใต้ความดันสูง ตัวอย่างเช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC)
2. สารให้ฟองทางเคมี (Chemical blowing agent) เป็นสารให้ฟองที่สามารถทำให้เกิดฟองก๊าซจากปฏิกิริยาเคมีหรือการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งก๊าซจะเข้าไปแทนที่ในพอลิเมอร์ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ สารให้ฟองชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองอินทรีย์ ได้แก่ แก๊สของสารคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต และสารให้ฟองอินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบเอโซและอนุพันธ์ของไฮดราซีน

สารให้ฟองที่ดีควรมีสมบัติดังนี้ [11]

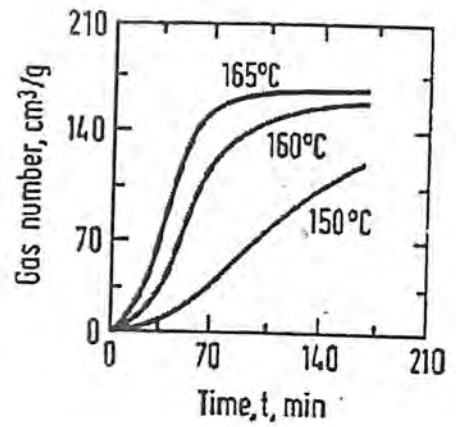
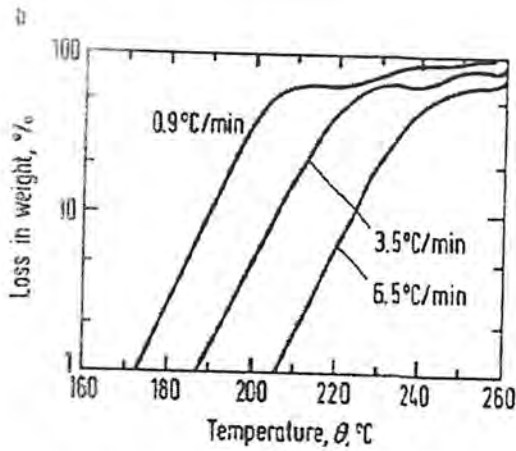
1. มีความเสถียรในสภาวะการใช้งานปกติ
2. เกิดฟองก๊าซในเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ
3. มีความเป็นพิษน้อย
4. ไม่มีผลกระทบต่อความเสถียรของกระบวนการผลิตและสมบัติของพอลิเมอร์
5. สามารถผลิตฟองก๊าซในขนาดที่เท่าๆกัน

ตาราง 2.3 สารให้ฟองทางเคมีที่ใช้ในการค้า [12]

Blowing agent type	Volatiles produced	Decomposition range ($^{\circ}\text{C}$)	Gas yield (cm^3/g)
Azocarbonamide	N_2 , CO , CO_2	190-230	220
Dinitrosopentamethy lenetetramine	N_2 , NO , H_2O CH_3 , NH_2	160-200	210
Benzenesulphonohy drazide	N_2 , H_2O	146	170-250
4,4'-Oxybis(benzenesulphonohy drazide)	N_2 , H_2O	150	120-180
N,N'-Dimethyl-N,N'-dinitrosoterephthalamide	N_2 , H_2O , CO_2	90-105	180
Azoisobutyronitrile	N_2	95-98	136
Sodium bicarbonate	CO_2	100-130	125-130
Terephthalazide	N_2	85-112	207-311
Trihydrazinotriazine	N_2 , NH_3	275	225

ในการวิจัยนี้เลือกใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) ซึ่งเป็นสารให้ฟองทางเคมีจำพวกสารอินทรีย์มีเอโซเป็นองค์ประกอบ มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 1.53-1.66 g/cm^3 เกิดปฏิกิริยาสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 190-240 $^{\circ}\text{C}$ ปริมาณก๊าซ 230-270 cm^3/g ความร้อนจำเพาะ 1090 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ AZ [10]

2.5 สารช่วยผสม [13]

สารช่วยผสม (Compatibilizer) คือสารที่เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวระหว่างสองวัสดุ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็กและทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัสดุดีขึ้น วิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1. Non-reactive blending คือการเติมสารช่วยผสมที่มีสูตร โครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสมโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับพอลิบิวทาไดอินแบบโคโบล็อก
2. Reactive blending คือการเติมสารช่วยผสมที่มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

2.5.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [14]

มาเลอิกแอนไฮไดรด์ผลิตได้จากกระบวนการดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ของกรดมาเลอิก (Maleic acid) โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในการเคลือบผิวหน้า เป็นสารที่ใช้ในการยึดติดและสารตัวเติมในสารหล่อลื่น เป็นต้น

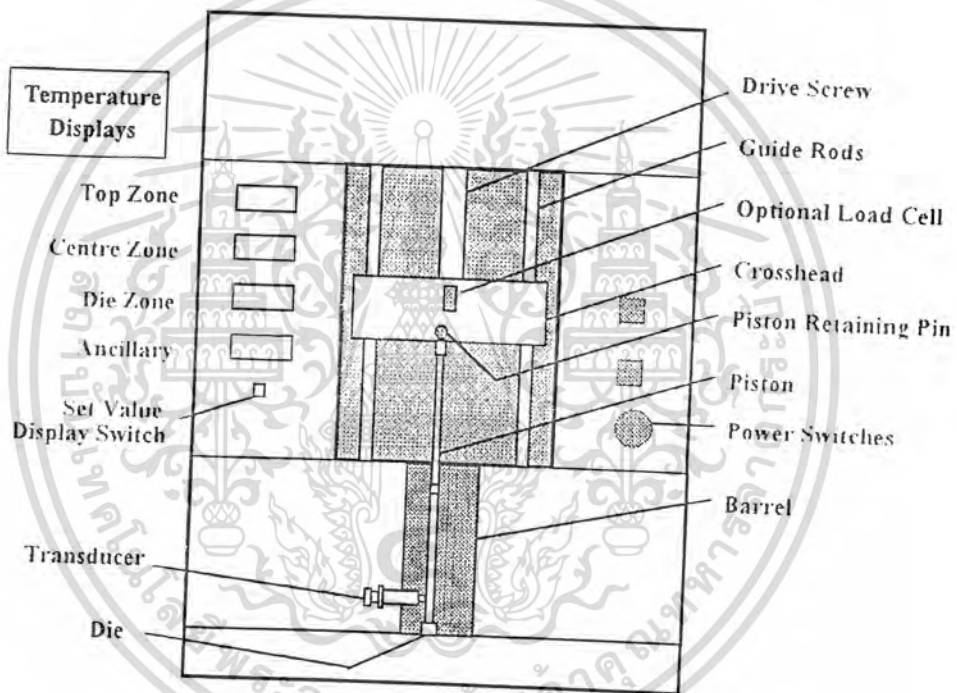
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene grafted maleic anhydride, HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสมชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยาหรือรีเอ็กทีฟ (Reactive compatibilizer) เป็นการต่อกิ่ง (Grafting) พอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรแล้ว จะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีน โดยทำให้ความชอบน้ำ (Hydrophilicity) เพิ่มขึ้นและความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮโดรลด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านความร้อนและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นได้เป็นอย่างดี

2.6 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล [15]

เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล (Capillary Rheometer) เป็นเครื่องมือวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในงานเชิงอุตสาหกรรม มีลักษณะดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากอัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate) มีค่าสูงและอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องมือแปรรูปพอลิเมอร์



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล [16]

หลักการอย่างง่ายของ Capillary Rheometer คือ การกดอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในกระบอกสูบด้วยอัตราความเครียดเฉือนที่คงที่ แล้วหาความเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้น หรือควบคุมให้ลูกสูบกดอัดด้วยความเค้นเฉือนที่คงที่ แล้วหาอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปคำนวณค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

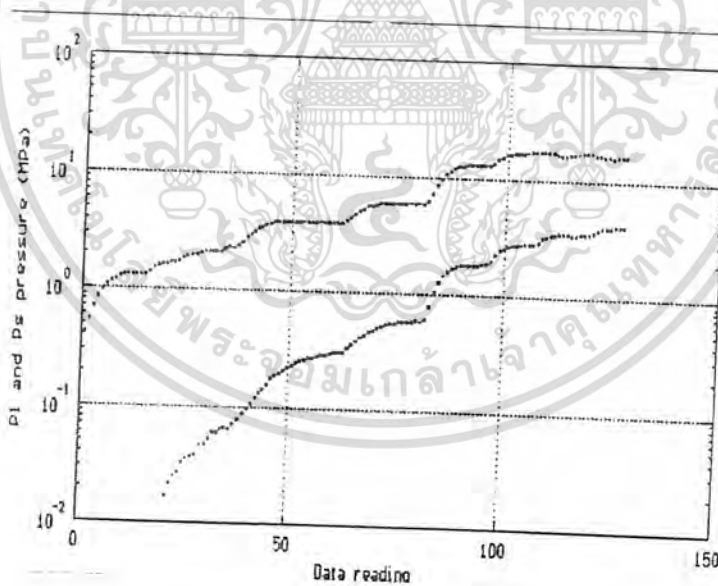
$$\text{Shear stress, } \tau = PR/2L$$

$$\text{Shear strain rate, } \gamma' = 4Q/\pi R^3$$

$$\text{Shear viscosity, } \eta = \tau/\gamma'$$

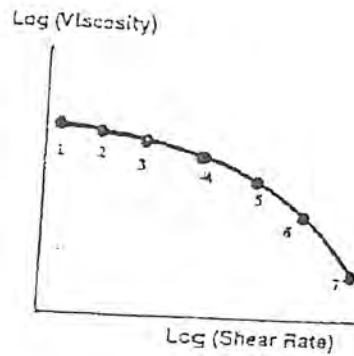
- เมื่อ P คือ ความดันตกคร่อมที่หัวดาย (Pressure drop across die)
 R คือ รัศมีของหัวดาย (Die radius)
 L คือ ความยาวของหัวดาย (Die length)
 Q คือ อัตราการไหลของพอลิเมอร์เชิงปริมาตร (Volumetric output rate)

เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง (Piston velocity) นั่นคือ ควบคุมให้อัตราความเครียดเฉือนคงที่ ความดันตกคร่อมภายในหัวดาย (Pressure drop across die) จะถูกวัดด้วยเครื่องตรวจวัดความดัน (Pressure sensor or transducer) เมื่อความดันเพิ่มขึ้นได้ค่าคงที่ ค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการคำนวณค่าความเค้นเฉือนต่อไป จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนความเร็วของลูกสูบเพื่อบันทึกค่าความดันอื่นๆ ซึ่งถ้าใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานก็จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 2.12 นำค่าที่ควบคุมและผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาความหนืดเฉือน



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาใน Capillary Rheometer [16]

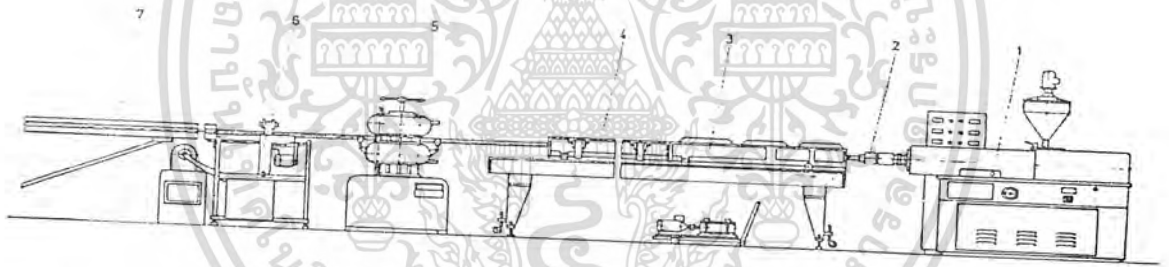
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความถี่การเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์หลอมเหลว [15]

2.7 กระบวนการผลิตท่อ [17]

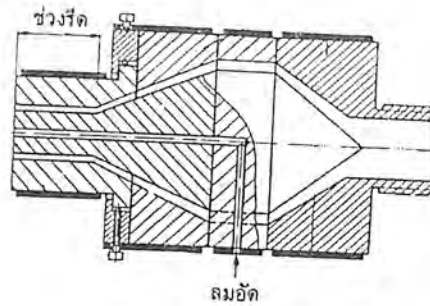
กระบวนการผลิตท่อสามารถทำได้โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) สำหรับการผลิตท่อโดยประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตท่อ โดยที่ (1) เครื่องอัดรีด (2) หัวฉีดท่อหรือคายน (3) เครื่องมือปรับขนาด (4) อ่างน้ำหล่อเย็น (5) เครื่องดึงแบบดินตะขาบ (6) เลื่อยตัด และ (7) รางกระดก [17]

สำหรับกระบวนการอัดรีด (Extrusion) จะใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) เป็นตัวผสมให้พลาสติกเข้ากัน โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหนอน (Screw) และกระบอกใส่ ทำให้เกิดแรงเฉือนช่วยในการผสมและการหลอมเหลวพลาสติก หลังจากนั้นจะเป็นของเหลวหนืดขึ้นรูปโดยผ่านหัวฉีดหรือหัวคายน (Die) ซึ่งจะเป็นลักษณะตามรูปพรรณตามต้องการ โดยหัวฉีดท่อหรือหัวคายน นี้จะมีลักษณะตามรูปที่ 2.15

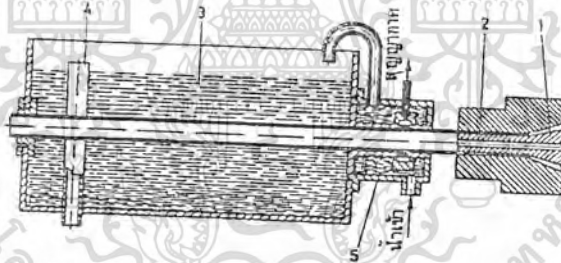
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 หัวฉีดท่อ [17]

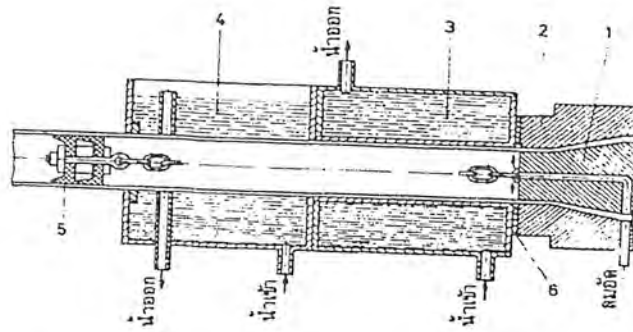
หลังจากที่ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะมีอุปกรณ์ต่างๆ ในการปรับแต่งชิ้นงานให้มีความยาวของท่อตามต้องการ จากการขึ้นรูปชิ้นงานผ่านหัวฉีดท่อมาชิ้นงานที่ยังมีลักษณะไม่แข็งตัว เสี่ยงรูปทรงได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ปรับขนาดที่ทำหน้าที่รักษายกขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานให้คงที่จนกว่าชิ้นงานจะแข็งตัว ท่อตามปกติจะปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก วิธีการปรับขนาดโดยใช้สุญญากาศ และแบบใช้ลมอัด พร้อมจุกอุดตามชิ้นงาน

วิธีการปรับขนาดโดยใช้สุญญากาศ ทำงานด้วยท่อปรับขนาดและห้องสุญญากาศโดยห้องสุญญากาศนี้จะมีรูหรือร่องเล็กๆ ผ่านท่อปรับขนาดไปยังท่อพลาสติกซึ่งจะถูกสุญญากาศที่ผิวหล่อเย็นด้านในของท่อปรับขนาดดู ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การปรับขนาดท่อด้านนอกด้วยระบบสุญญากาศ โดยที่ (1) แกน (2) หัวฉีด (3) ถังน้ำเย็น (4) ท่อน้ำล้น (5) ห้องสุญญากาศ [17]

วิธีการปรับขนาดโดยใช้ลมอัดและฝาจุกปิด ท่อขนาดใหญ่จะใช้แรงดันของลมต้านกับท่อปรับขนาดที่ทำการหล่อเย็น ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้จุกปิดท่อ ในกรณีง่ายๆ จะใช้การผูกหรือการเชื่อมปลายท่อ ถ้าเป็นแบบต่อเนื่องจะดีถ้าใช้จุกปิดตามโดยติดไว้ที่แกนหัวฉีด ดังรูปที่ 2.17

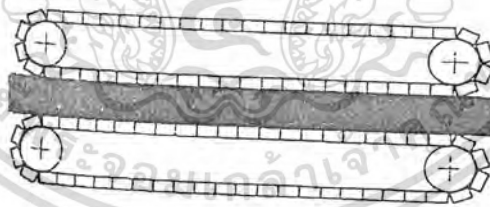


รูปที่ 2.17 การปรับขนาดท่อด้านนอกด้วยระบบลมอัดและฝาจุกปิด โดยที่

- (1) แคน (2) หัวฉีด (3) ปตอกปรับขนาด
(4) ถังน้ำหล่อเย็น (5) ฝาจุกปิด (6) ฉนวนกันความร้อน [17]

อุปกรณ์ในการหล่อเย็น การหล่อเย็นสำหรับการปรับขนาดของชิ้นงานนั้น ส่วนใหญ่ไม่เพียงพอสำหรับการคงรูปของชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องมีการหล่อเย็นต่อไปอีกหลังจากผ่านอุปกรณ์ปรับขนาดแล้วโดยจะใช้น้ำหรืออากาศ บางครั้งผนังหนา ๆ จะต้องหล่อเย็นอย่างมาก จำเป็นจะต้องใช้อ่างน้ำหล่อเย็นหรือระบบพ่นน้ำ

อุปกรณ์ดึงชิ้นงาน จากช่วงการหล่อเย็นจะต้องมีอุปกรณ์ดึงชิ้นงานให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยจะจับชิ้นงานและดึงเคลื่อนไปด้วยความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วของเครื่อง Extruder เพื่อไม่ให้เป็นรอยดึงที่ตัวชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องดึงแรงกดบนชิ้นงานให้พอดี ในการดึงท่อจะใช้อุปกรณ์ดึงแบบดินตะขาบ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพดินตะขาบดึงชิ้นงาน [17]

อุปกรณ์การตัด ในการเก็บและขนส่งชิ้นงานที่แข็งและเปราะหรือชิ้นงานที่ต้องการความยาวที่เป็นมาตรฐาน จำเป็นจะต้องตัดให้มีขนาดพอเหมาะเท่าๆ กัน ในกรณีนี้จะใช้เลื่อย ไขว้ หรือกรรไกรตัด บางลักษณะการตัดต้องใช้เวลาานซึ่งตรงกันข้ามกับกระบวนการผลิตที่กระทำอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วของเครื่องดึงชิ้นงานและเครื่องอัดรีดจำเป็นที่อุปกรณ์ในการตัดต้องดำเนินงานไปพร้อม ๆ กับชิ้นงาน ในขบวนการผลิตจึงมีแท่นเลื่อย มีล้อเลื่อนพร้อมไขว้ตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Burgoyne และคณะ [18] นำผงยางรถยนต์มาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในยางรถยนต์ พบว่า ขนาดผงยางรถยนต์เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณผงยางรถยนต์ที่สามารถเติมในยาง การเติมผงยางรถยนต์เป็นสารเพิ่มเนื้อจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของชิ้นงานทดสอบลดลง และการเติมผงยางรถยนต์ขนาดเล็กกว่าจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพลดลงน้อยกว่าการเติมผงยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณผงยางรถยนต์มากที่สุดที่เติมลงในยาง โดยทำให้คุณสมบัติต่างๆมีค่าลดลงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ 10% โดยน้ำหนัก

Sawant และ Kale [19] นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผสมกับผงยางรถยนต์ และศึกษาคุณสมบัติต่างๆในช่วงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ GRT/HDPE 80/20 จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเพราะสมบัติความไม่เท่ากันระหว่างผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

Pramanik และ Baker [20] นำผงยางจากเศษยางรถยนต์ขนาด 40 และ 80 เมช มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกโดยเติมเอทิลีนอะคริลิกแอซิด (Ethylene-acrylic acid) และยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (Epoxydized natural rubber) เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น หรือผงยางจากเศษยางรถยนต์มีขนาดเล็กลงจะทำให้สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) ลงไปจะทำให้สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น และถ้าเคลือบผงยางจากเศษยางรถยนต์ด้วยไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์และไตรเอทิลไซยานูเรต (Triallyl cyanurate) จะทำให้สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Kowalska และ Wielgosz [21] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับพอลิเอทิลีน (ไม่ระบุชนิด) โดยเติมสารให้ฟอง และสารช่วยผสม จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้นความแข็งแรง ณ จุดขาด (Breaking strength) และความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรง ณ จุดขาดจะมีค่าลดลง ส่วนความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อผงยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง ความสม่ำเสมอของรูพรุนและความหนาแน่นของท่อน้ำซึมจะลดลง จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำพบว่า ท่อที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 60/40 – 65/35 มีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำแปรผกผันกับความยาวของท่อ

Rajalingam และคณะ [22] นำผงยางรถยนต์ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น ผงยางรถยนต์ที่ใช้เตรียมได้จากวิธีการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

grinding) และแบบเปียก (Wet ambient grinding) และการบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding) ที่อุณหภูมิต่ำ -195°C จากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวของผงยางรถยนต์ที่เตรียมได้จาก 3 วิธี พบว่า ผงยางรถยนต์ที่เตรียมได้จากการบดแบบแห้ง และแบบเปียก มีพื้นที่ผิวมากและมีลักษณะขรุขระ ส่วนผงยางรถยนต์ที่ใช้วิธีบดที่อุณหภูมิต่ำจะมีพื้นผิวเรียบ พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของผงยางรถยนต์น้อยกว่าผงยางรถยนต์ที่เตรียมจากการบดที่อุณหภูมิต่ำแบบแห้งและแบบเปียก จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ด้วยวิธีบดแบบเปียกจะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ด้วยวิธีบดแบบแห้งและบดที่อุณหภูมิต่ำตามลำดับ ผลการศึกษาเทคนิคการปรับปรุงพื้นผิวของยางรถยนต์ ได้แก่ Electron beam radiation treated GRT, Corona treated GRT และ Plasma treated GRT พบว่าวิธี Electron beam radiation treated GRT เป็นวิธีที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความต้านทานแรงกระแทกดีที่สุด

Kim [23] ศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมที่มีเศษยางที่ใช้แล้วเป็นสารตัวเติมในสารประกอบมีขั้วคือยางธรรมชาติ (NR) และสารประกอบไม่มีขั้วคือยางอะครีโรไนไตรล์บิวตะไดอิน (NBR) นำยางผสมที่ได้มาทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) โดยเปรียบเทียบระหว่างยางที่เติมเศษยาง ซิลิกาและซิลิกาผสมเศษยาง พบว่ายาง NR ที่เติมเศษยางและที่เติมซิลิกาผสมเศษยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ส่วนยาง NR ที่เติมซิลิกามีสมบัติเชิงกลลดลง สำหรับยาง NBR ที่เติมซิลิกามีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แต่ยาง NBR ที่เติมเศษยางและที่เติมซิลิกาผสมเศษยางมีสมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้การทำคลอรีนชัน (Chlorination) ของเศษยางก่อนนำไปใส่ในเมทริกซ์จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ โดยยาง NR ที่เติมเศษยางที่ทำคลอรีนชันแล้วมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเศษยางที่ไม่ทำคลอรีนชัน ส่วนยาง NBR ที่เติมเศษยางที่ทำคลอรีนชันมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าไม่ทำคลอรีนชัน และเมื่อศึกษาการเติมสารช่วยผสมพบว่ายาง NR ผสมสูตรเมื่อเติมสารช่วยผสมจะมีสมบัติเชิงกลลดลง ส่วนยาง NBR ผสมสูตรเมื่อเติมสารช่วยผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

คนัมพร สวัสดิ์ชุมพล จงจิตร ลาภนิกรชัย และฉัตรมณี ขันทอง [4] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาด 40 เมช และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ได้แก่ ปริมาณสารให้ฟอง (AZ) อัตราส่วนระหว่าง GRT/LLDPE ผลของคิกเกอร์ ปริมาณสารช่วยผสม (PE-g-MA) และปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วน GRT:LLDPE:AZ เท่ากับ 70:30:7 จะทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วงที่ต้องการ เมื่อเติมสารเชื่อมโยงและสารช่วยผสมจะทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้นแต่อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง อัตราส่วน GRT:LLDPE:AZ:PE-g-MA:DCP ที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมคือ 70:30:7:4:0.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมคิกเกอร์ (Kicker) จะทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะช่วย ศึกษาคุณสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และผงยางรถยนต์ (GRT) โดยใช้สารเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม เช่น สภาพในการขึ้นรูป ปริมาณของสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่าง GRT/HDPE ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ ชนิดของ HDPE และปริมาณของสารเชื่อมโยง (DCP) ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา พบว่าสภาพในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือใช้เวลาในการกดอัด 5 นาทีที่ อุณหภูมิ 230 °C อัตราส่วน GRT/HDPE ที่เหมาะสมคือ 60/40 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเติม AZ และเพิ่มปริมาณมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง โมดูลัส ความแข็งแกร่งและความหนาแน่น แต่จะทำให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้น เช่น เปอร์เซ็นต์การยืด ฌ จุดขาดและการซึมผ่านของน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง DCP เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้น แต่มี เปอร์เซ็นต์การยืด ฌ จุดขาดและการซึมผ่านของน้ำลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 พยางรถยนต์ (Ground rubber tires, GRT) ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) ขนาด 20 เมช จากบริษัทแสวงไทยผลิตยางจำกัด

3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ที่ใช้ในการทดลอง แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- HDPE บริสุทธิ์มีดัชนีการไหล 0.9 g /10 min จากบริษัท CCC Chemical Commerce Co., Ltd. เกรด H 5690S สำหรับงานอัดรีด (Extrusion)
- HDPE ชนิดเติมสารเติมแต่งเขม่าดำ (Carbon black) มีปริมาณเขม่าดำ 2-3 % โดยน้ำหนัก มีดัชนีการไหล 0.11 g /10 min จากบริษัท CCC Chemical Commerce Co., Ltd. เกรด H5211PC สำหรับงานอัดรีด (Extrusion) ผลิตภัณฑ์ใช้งานกลางแจ้ง (Outdoor uses)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

สมบัติ	หน่วย	ชนิดของ HDPE	
		H 5690S	H 5211PC
ดัชนีการไหลที่ 2.16 kg 190 ^o C	g/10min	0.9	0.11
ความหนาแน่น	g/cm ³	0.95	0.96
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	kg/cm ³	420	300
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	>900	>500
อุณหภูมิอ่อนตัว	°C	125	122
จุดหลอมเหลว	°C	131	131

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 สารให้ฟอง (Blowing agent) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) จากบริษัทยูซาโก้ (ไทยแลนด์) จำกัด เกรด D 800

3.1.4 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) จากบริษัทยูซาโก้ (ไทยแลนด์) จำกัด

3.1.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene grafted maleic anhydride, HDPE-g-MA) บริษัท Uniroyal Chemical Co., Ltd. เกรด Polybond[®] 3009 คัทนีการไหล (MFI) 5 g/10 min

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารให้ฟอง AZ

สมบัติ	ค่า
ชื่อเคมี	Azodicarbonamide (Azobisformamide)
สูตรโครงสร้าง	$\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{N}=\text{CO}-\text{NH}_2$
ลักษณะ	ผงสีเหลือง
อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)	202-206
ปริมาตรก๊าซที่ให้ได้ (cm^3/g)	225-250
ความร้อนจำเพาะ	0.26
ความถ่วงจำเพาะ	1.65
พีเอช (pH)	6-8
น้ำหนักโมเลกุล	116.08
ความร้อนจากการสลายตัว	10 kcal/mol
ปริมาณความชื้น	max 0.3%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) รุ่น PolyDrive with Rheomix R 252 บริษัท HAAKE Co., Ltd.

3.2.2 หัวฉายรูปท่อ (Tube die)

3.2.3 เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Boseo Engineering Co., Ltd

3.2.4 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล (Capillary rheometer) รุ่น Rosand Rheometer Type Rh 7/2 บริษัท Rosand Precision Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำและก๊าซในโพรเจน

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

รุ่น LEO 1450 VP

3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น LR 30K บริษัท

LLOYD Instruments

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ทำการชั่งตามสูตรผสมดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง

สาร	สูตรที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H 5690S (ส่วนโดยน้ำหนัก)	100	40	40	40	40	40	-	-	-	-	-	-
H 521IPC (ส่วนโดยน้ำหนัก)	-	-	-	-	-	-	100	40	40	40	40	40
GRT (ส่วนโดยน้ำหนัก)	-	60	60	60	60	60	-	60	60	60	60	60
AZ (phr)	-	-	8	8	8	8	-	-	8	8	8	8
DCP (%*)	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1
PE-g-MA (%**)	-	-	-	3	-	3	-	-	-	3	-	3

หมายเหตุ %* : คิดเทียบกับ GRT

%** : คิดเทียบกับ HDPE+GRT

3.3.2 นำส่วนผสมแต่ละสูตรผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว อุณหภูมิที่หัวดายเป็น 180°C ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที

3.3.3 นำของผสมที่ได้มาทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเม็ด

3.3.4 นำของผสมที่บดละเอียดแล้วส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องทดสอบพฤติกรรมกรไหล

3.3.5 เก็บของผสมที่เหลือเพื่อใช้ขึ้นรูปเป็นท่อและทดสอบต่อไป

3.4 การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ท่อ

นำของผสมที่บดละเอียดแล้วมาขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีด โดยผ่านดายรูปท่อ (Tube die) อุณหภูมิที่หัวดายเป็น 220°C ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบ

3.5.1 การทดสอบสมบัติการไหล

นำพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรที่บดละเอียดทำการทดสอบสมบัติการไหลตามมาตรฐาน ASTM D3835 [24] ด้วย Capillary Rheometer โดยใช้หัวดายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความยาว 0 และ 16 mm ที่มี 2 กระบอกสูบ โดยตั้งสภาวะของเครื่องที่อุณหภูมิ 190 °C ความเร็วในการกดอัด 1 2 5 10 50 100 150 และ 200 mm/min ผลที่ได้จะนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืดเฉือนที่แท้จริง (True shear viscosity) กับอัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate)

3.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม

3.5.2.1 ความทนแรงกด

ทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 746-2530 [25]

1. เครื่องมือ

1.1 เครื่องทดสอบเนกประสงค์

1.2 แผ่น โลหะเรียบกว้าง 80 mm สามารถรับแรงกดในระหว่างทดสอบได้ โดยไม่เสียรูปจำนวน 2 แผ่น

1.3 เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่ออย่างทีวัดได้ละเอียดถึง 0.1 mm

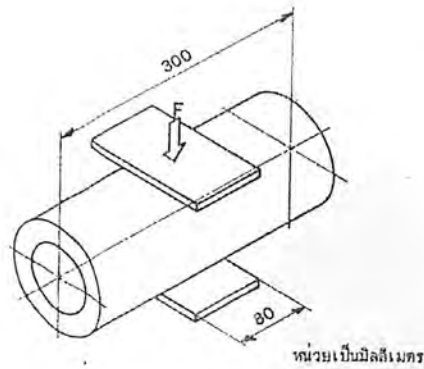
2. การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างเป็นชิ้นทดสอบยาว 300 mm

3. วิธีทดสอบ

3.1 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเริ่มต้นตรงจุดกึ่งกลางชิ้นทดสอบ (D_0) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเดิม

3.2 ประกบแผ่นโลหะทั้งสองให้อยู่กึ่งกลางชิ้นทดสอบตรงจุดที่วัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเริ่มต้น ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การทดสอบความทนแรงกดตามมาตรฐาน มอก. 746-2530 [25]

3.3 กดแผ่นโลหะด้วยความเร็ว 50 ± 5 mm/min จนกระทั่งอ่านค่าแรงกดได้ตามตารางที่ 3.4 แล้วรักษาแรงกดนี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.4 แรงกดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 746-2530 [25]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	แรงกด (kN)
25 31.5	0.9
38 44	1.0
51 57	1.1
63 76 89 102	1.45
127 152 178 203	1.75
มากกว่า 203 ขึ้นไป	2.05

3.4 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อวางที่แฟบลงโดยการวัดระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง (D_1)

3.5 ทันทีกี่คลายแรงออก ให้วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่ำสุดในบริเวณที่ถูกกด (D_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วิธีคำนวณ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด ร้อยละ = $(D_1 / D_0) \times 100$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหลังคลายแรงกดออก ร้อยละ = $(D_2 / D_0) \times 100$

เมื่อ D_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เริ่มต้น (mm)

D_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด (mm)

D_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหลังคลายแรงกดออก (mm)

เมื่อทดสอบแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อภายใต้แรงกดและเมื่อคลายแรงกดออกต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 และร้อยละ 90 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเดิม ตามลำดับ

หมายเหตุ 1. แผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลองจริงเป็นแผ่นโลหะวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm เนื่องจากไม่สามารถหาแผ่นโลหะที่มีขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด

ได้

2. ท่อที่ทำการผลิต ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12-13 mm เมื่อเทียบกับตาราง พบว่าท่อที่ได้มีขนาดเล็กกว่าท่อที่เล็กที่สุดตามมาตรฐานทดสอบ หากทำการลดแรงกดเพื่อให้ได้อัตราส่วนเดียวกันกับมาตรฐานพบว่าแรงกดที่ใช้มีค่าประมาณ 0.8 kN สำหรับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12-13 mm แต่ในการทดลองจริงสามารถกดด้วยแรงคงที่ที่ 0.1 kN เท่านั้น เนื่องจากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์มีระยะจำกัดในการเคลื่อนที่ลง (Safety option)

3.5.2.2 การทดสอบสมบัติแรงดึงยืด

ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงตาม ASTM D638M

- นำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นท่อแล้วมาตัดแล้วกลึงออกให้ได้เป็นแผ่น
- นำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ ให้ได้ตัวอย่างชิ้นงาน 6 ชิ้น นำไปทดสอบที่สภาวะดังนี้

Test speed 100 mm/min

Gauge length 25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การทดสอบสมบัติการซึมของน้ำ

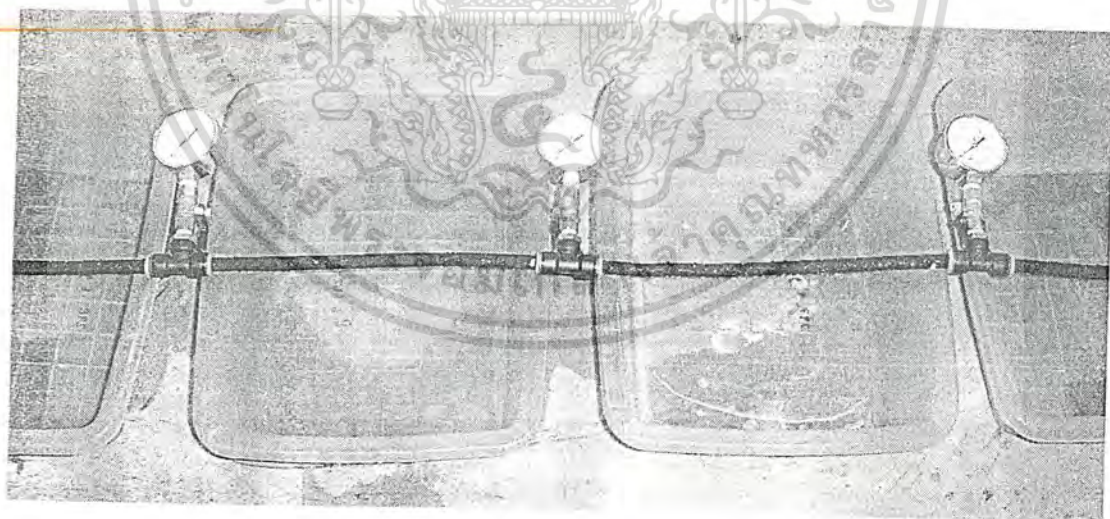
3.5.3.1 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำต่อความยาวท่อ

1. นำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดมาตัดให้ได้ความยาว 1 ฟุต
2. นำท่อที่ได้ไปต่อเข้ากับเครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำแล้วเชื่อมด้วยท่อพีวีซีต่อสลับกันไป ดังรูปที่ 3.2
3. เปิดก๊าชไนโตรเจนที่ความดัน 0.2 0.4 และ 0.6 bar
4. นำถังที่ชั่งน้ำหนักแล้วมารองรับน้ำที่ซึมออกมาจากท่อพร้อมกับจับเวลา
5. นำถังไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณของน้ำ จากนั้นนำไปหาค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำ โดยเปรียบเทียบปริมาตรต่อเวลาต่อความยาวของท่อ

3.5.3.2 การศึกษาความดันลดของท่อน้ำซึม

เป็นการศึกษาหาความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้น

1. นำเกจวัดความดันไปต่อเข้าที่บริเวณข้อต่อระหว่างท่อ ดังรูปที่ 3.2
2. วัดค่าความดันในแต่ละช่วงแล้วนำค่ามาสร้างกราฟระหว่างความดันกับความยาวของท่อ



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงการจัดอุปกรณ์ทดสอบการซึมของน้ำและความดันลดของท่อน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

นำท่อน้ำซึมที่ได้ไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเรียบ ไม่เกิดการขีดตัวของพอลิเมอร์ นำชิ้นงานไปทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อศึกษาขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน



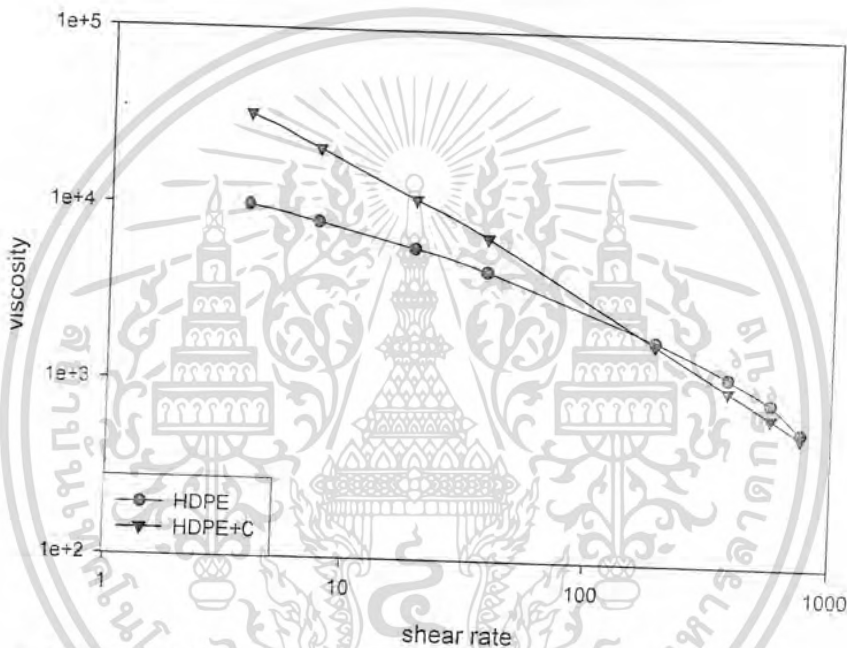
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาสมบัติการไหล

จากการทดสอบพฤติกรรมการไหลของสูตรผสมด้วยเครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิ 190°C ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1-4.3 และตารางที่ 4.1

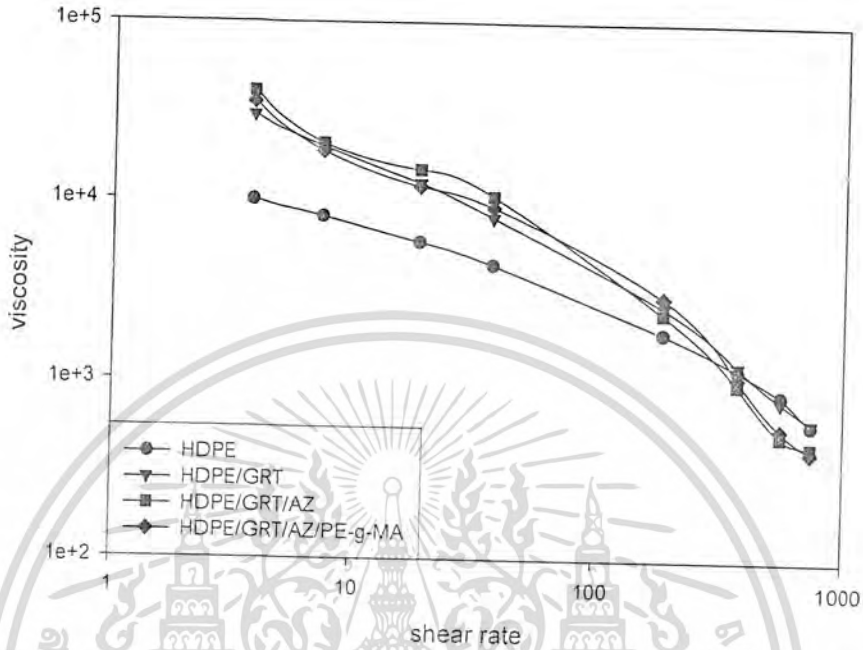


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ Shear rate ของ HDPE และ c-HDPE

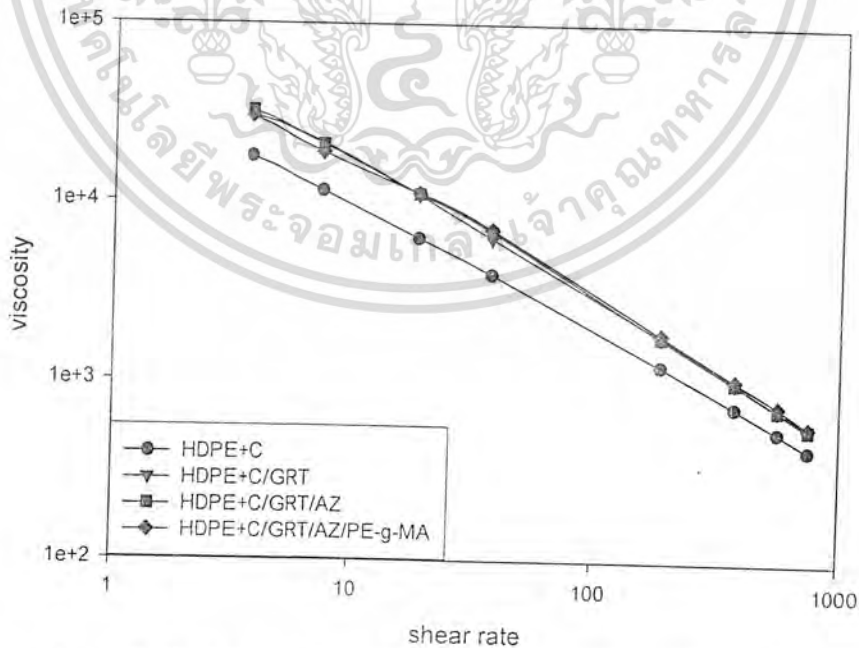
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการเฉือน (Shear rate) เพิ่มขึ้น ความหนืด (Viscosity) จะมีค่าลดลง แสดงว่า HDPE ทั้ง 2 ชนิด มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) นั่นคือ เมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลส่วนใหญ่จัดเรียงตัวตามแนวแรงมากขึ้น ทำให้การต้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ตามแนวแรงมีน้อยลง เป็นผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวน้อยลง โอกาสเกิดการคลายตัว (Disentanglement) มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดของพอลิเมอร์ 2 ชนิด พบว่า c-HDPE มีความหนืดสูงกว่า HDPE เนื่องจาก c-HDPE มีดัชนีการไหล (MFI) ต่ำกว่า HDPE (c-HDPE มี MFI = $0.11 \text{ g}/10 \text{ min}$ ขณะที่ HDPE มี MFI = $0.9 \text{ g}/10 \text{ min}$) ซึ่งหมายถึง c-HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า HDPE จึงทำให้ความหนืดที่ได้มีค่าสูงกว่า HDPE และจะเห็นได้ว่าที่ Shear rate ต่ำๆ ความหนืดของ c-HDPE และ HDPE จะมีค่าเท่ากันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากที่ Shear rate ต่ำๆ สายโซ่เกิดการคลายตัวน้อย จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ยาก ความหนืดจึงมีค่าต่างกันอย่างชัดเจน แต่สำหรับที่ Shear rate สูงๆ การคลายตัวของสายโซ่เกิดขึ้นทั่วทั้งหมดแล้ว สายโซ่จึงเคลื่อนที่ได้ง่าย ความแตกต่างของความหนืดจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ Shear rate ของ HDPE ที่มีการเติม GRT และ Additive ต่างๆลงไป



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ Shear rate ของ c-HDPE ที่มีการเติม GRT และ Additive ต่างๆลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น ความหนืดของของผสมมีค่าลดลง แสดงว่าทุกสูตรผสมมีความเป็นชิวโคพลาสติก และเมื่อเติม GRT ลงไปใน HDPE (รูปที่ 4.2) และ c-HDPE (รูปที่ 4.3) พบว่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก GRT ที่เติมนั้นเป็นสารตัวเติม (Filler) ที่เป็นอนุภาคของแข็งจึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และเมื่อเติม สารเติมแต่ง (Additive) ตัวอื่นๆ คือสารให้ฟอง AZ และสารช่วยผสม PE-g-MA ลงไป พบว่าความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของสูตรผสมที่ไม่มีการเติมสารเหล่านี้ เนื่องจากสารที่เติมนั้นมีปริมาณน้อยมาก ส่วนค่าความเป็นชิวโคพลาสติก (Pseudoplasticity) แสดงด้วยค่า Power law index (n) ซึ่งแต่ละสูตรมีค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า Power law index (n) ของของผสม

สูตรที่	สูตรผสม	n
1	HDPE	0.48
2	HDPE/GRT	0.27
3	HDPE/GRT/AZ	0.15
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.19
7	c-HDPE	0.29
8	c-HDPE/GRT	0.22
9	c-HDPE/GRT/AZ	0.22
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.25

จากตารางที่ 4.1 พบว่า n มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากสูตรที่ 1 ถึง 4 แสดงว่ามีความเป็นชิวโคพลาสติกมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Shear rate เพียงเล็กน้อยจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงความหนืดเป็นอย่างมาก ซึ่งหมายถึงทั้ง GRT AZ และ PE-g-MA ที่เติมลงไปส่งผลต่อรูปแบบการไหลของ HDPE อย่างมาก

สำหรับในสูตรที่ 7 ถึง 10 ค่า n มีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากเมตริกซ์ที่ใช้ในสูตรผสมนี้คือ c-HDPE (MFI = 0.11 g/10min) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า HDPE (MFI = 0.9 g/10min) แสดงว่าน้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด นั่นคือพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลง Shear rate น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

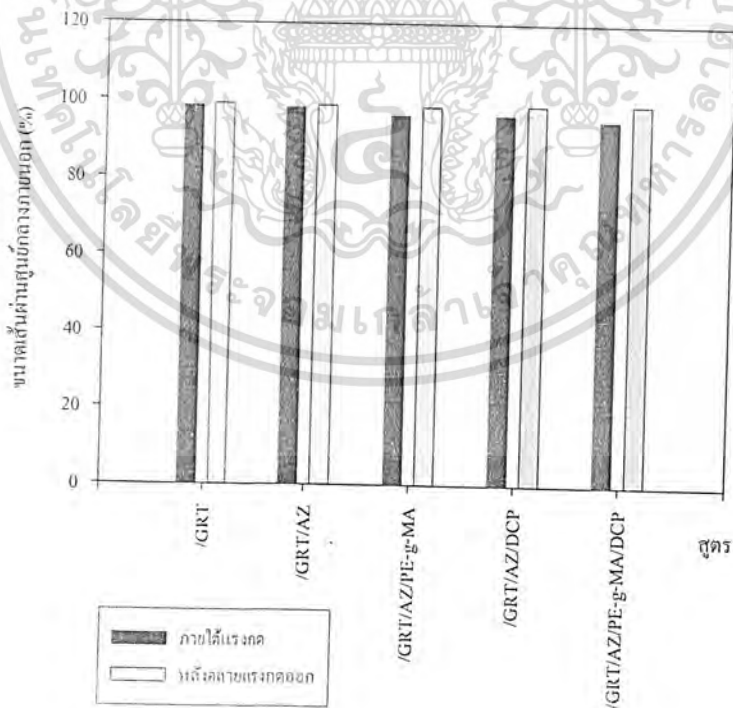
สำหรับในสูตรผสมที่มีการเติมสารเชื่อมโยง DCP ลงไปนั้นไม่มีการนำเสนอข้อมูล เนื่องจากทำการทดสอบไม่ได้เพราะ DCP ที่เติมลงไปจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพวงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ของผสมเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมากจนแข็งตัวไม่เกิดการไหล ทำให้ไม่สามารถทดสอบการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer ได้

จากการศึกษาสมบัติการไหลของของผสมในสูตรที่มี GRT เป็นองค์ประกอบ เมื่อทดสอบที่ Shear rate เดียวกัน ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปเป็นท่อหากมีการใช้ความเร็วรอบ (Screw speed) เดียวกัน นั่นคือใช้ Shear rate เท่ากัน ทุกสูตรผสมจะมีความสามารถในการขึ้นรูปใกล้เคียงกัน และของผสมมีเวลาอยู่ในเครื่องอัดรีดนานเท่าๆ กัน และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] AZ ใช้เวลาในการสลายตัว 2 นาที ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปท่อของของผสมทุกสูตรจึงใช้ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาทีเพื่อให้ AZ มีเวลาในการสลายตัวเพียงพอ

4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม

4.2.1 ความทนแรงกด

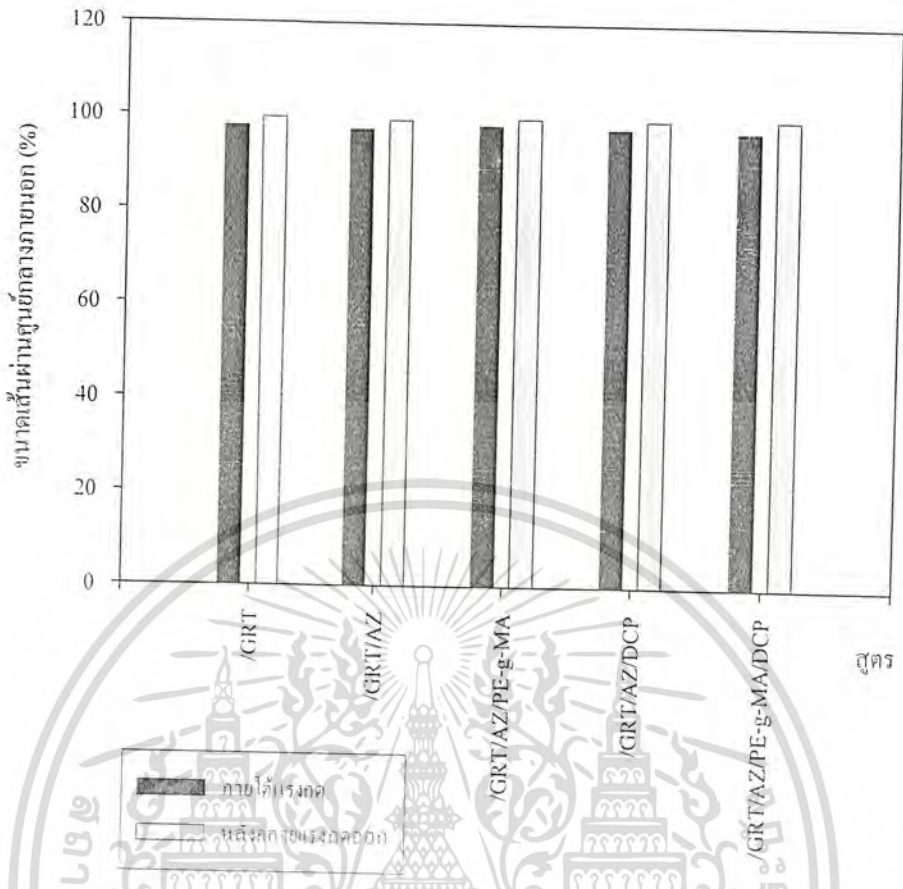
จากการทดสอบความทนแรงกดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ใช้แรงกดคงที่ 0.1 kN ได้ผลดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางภายนอกภายใต้แรงกด และเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี

HDPE เป็นเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

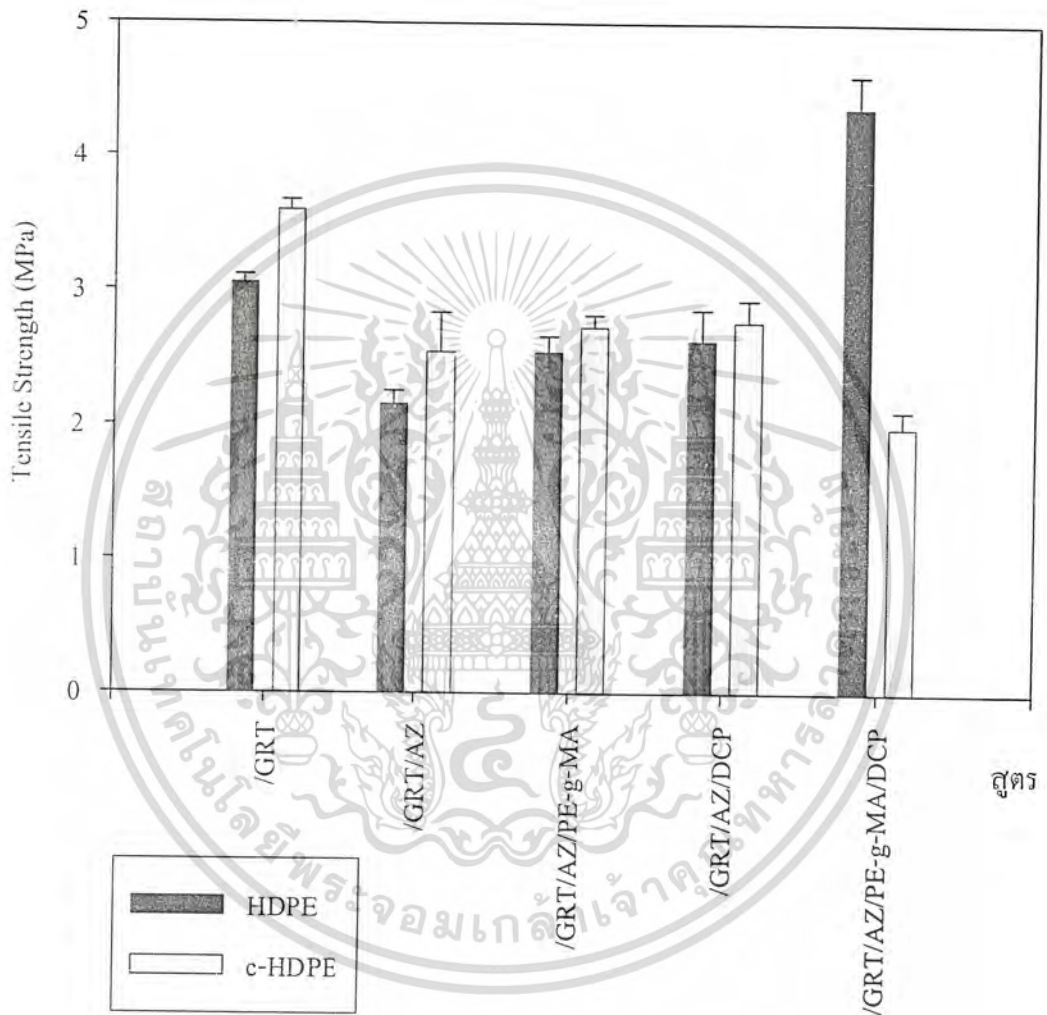


รูปที่ 4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด และเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี c-HDPE เป็นเมตริกซ์

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังคลายแรงกดออกมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด และจะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกดมีค่าใกล้เคียง 100% แสดงว่าท่อที่ผลิตได้มีความยืดหยุ่นดีและสามารถรับแรงกดได้ดีที่ระดับหนึ่ง (ภายใต้แรงกด 0.1 kN) อย่างไรก็ตาม การทดสอบการทนต่อแรงกดของท่อน้ำซึมในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมที่อย่าง (มอก. 746-2530) ของกระทรวงอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากในมาตรฐานนี้ไม่มีการระบุแรงกดสำหรับท่อขนาดที่เตรียมได้ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 12-13 มิลลิเมตร) ซึ่งตามมาตรฐานมอก. 746-2530 กำหนดแรงกดต่ำสุด 0.9 kN สำหรับท่อขนาดเล็กที่สุดคือ 25 มิลลิเมตร หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกดและเมื่อคลายแรงกดออกมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 และร้อยละ 90 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามลำดับ แสดงว่าเป็นท่อที่ได้ตามมาตรฐาน

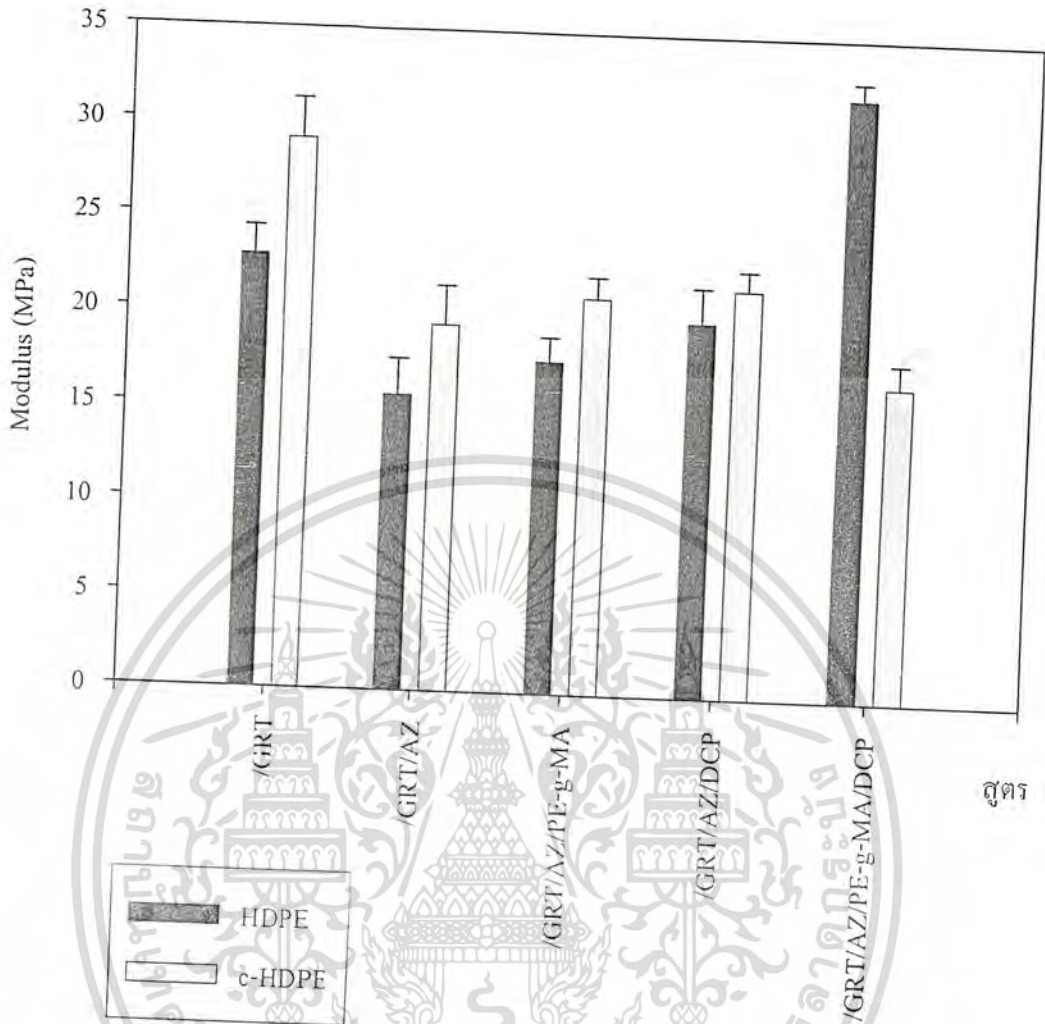
4.2.2 สมบัติแรงดึงยืด

จากการทดสอบสมบัติแรงดึงยืดของท่อน้ำซึม ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตาม ASTM D638M เพื่อคุณสมบัติต่างๆ คือ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) และ ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลดังรูปที่ 4.6-4.8



รูปที่ 4.6 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของท่อน้ำซึมสูตรต่างๆ

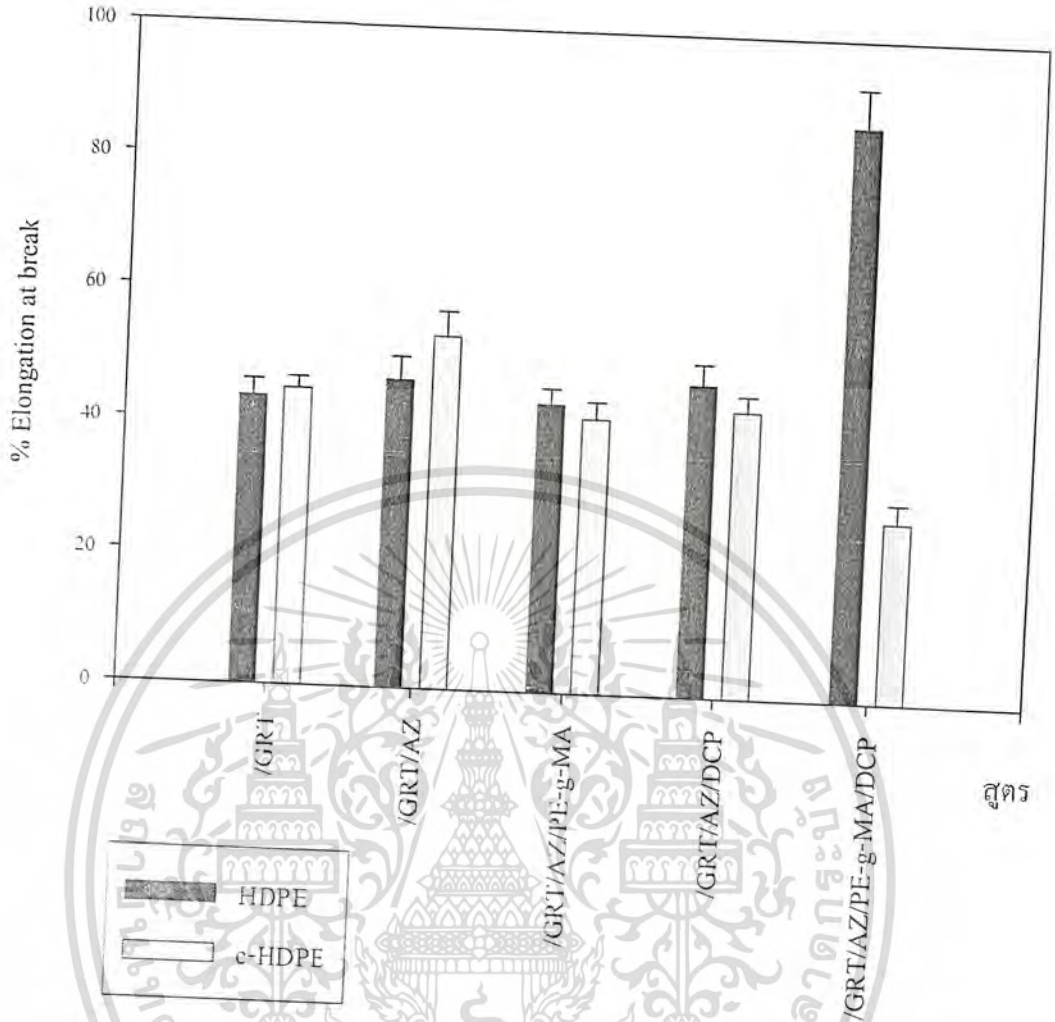
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัส (Modulus) ของท่อน้ำซึมสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าเมตริกซ์ทั้ง 2 ชนิดเมื่อเติมสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ของผสมจะมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มเหมือนกัน คือสูตรที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์ จะมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าสูตรที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์ เนื่องจาก c-HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า HDPE อย่างไรก็ตามก็ตีจากผลการทดลองพบว่าของผสมสูตรที่ใช้ HDPE ผสมทั้งสารให้ฟอง สารช่วยผสมและสารเชื่อมโยง (HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP) ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ทั้งสารช่วยผสมและสารเชื่อมโยง อาจทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์ (HDPE) มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก หรืออาจรบกวนปฏิกิริยาการสลายตัวของ AZ ทำให้วัสดุมีรูพรุนน้อยกว่าสูตรอื่นๆ ทำให้ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสและร้อยละการยืดจุดขาด จึงมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของท่อน้ำเชื่อมสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.6-4.8 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างสูตรผสม HDPE/GRT กับสูตรผสม HDPE/GRT/AZ และระหว่างสูตรผสม c-HDPE/GRT กับสูตรผสม c-HDPE/GRT/AZ พบว่าเมื่อเติมสารให้ฟอง AZ ลงไป จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อ AZ ได้รับความร้อนเกิดการสลายตัวให้ฟองก๊าซขึ้น ซึ่งทำให้เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงานเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีตำหนิ (Defect) เกิดการเสียหายได้ง่ายเมื่อให้แรงภายนอกมากระทำต่อชิ้นงาน จึงทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกมาดึงให้วัสดุยืดขยายขนาดจะส่งผลให้รูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากทรงกลมเป็นวงรีและยืดตัวในแนวแรง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการยึดตัวของชิ้นงานในแนวแรง จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของการเติม PE-g-MA ลงในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PE-g-MA เป็นสารช่วยกระจายตัวทำให้ช่วยในการยึดกันระหว่าง HDPE กับอนุภาคของผงยางรถยนต์ GRT เพราะ PE-g-MA มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนของสายโซ่หลักของพอลิเอทิลีน (PE) และส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่ต่อกิ่งคือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ในส่วนของ PE จะเกิดการเกี่ยวพันกันกับสายโซ่ของ HDPE และส่วนของ MA อาจเกิดการยึดเกาะหรืออันตรกิริยาจากความมีขั้วที่ต่างกันหรือไดโพล (Dipole) กับเขม่าดำ (Carbon black) ที่มีอยู่ในผงยางรถยนต์จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4]

การศึกษาผลของการเติม DCP ลงในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ เนื่องจากชิ้นงานเป็นวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งเป็นการผสมระหว่าง HDPE กับผงยางรถยนต์ เมื่อเติม DCP ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) ลงไป เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Free radicals) ทำการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของผงยางรถยนต์ที่มีพันธะไม่อิ่มตัวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้เป็นอนุมูลคาร์บอน (Carbon radicals) ภายในสายโซ่เป็นสาเหตุให้วัสดุเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นในวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) จึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกลทั้งค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง

ศึกษาผลของการเติม PE-g-MA และ DCP ลงในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ พบว่าจะทำให้สูตรผสมนี้มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากทั้งในส่วนของ PE-g-MA ซึ่งช่วยในการยึดกันระหว่าง HDPE กับอนุภาคของผงยางรถยนต์แล้ว ในส่วนของ DCP ที่เติมลงไปยังเพิ่มการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ อาจทำให้พอลิเมอร์เม็ดรีซ (HDPE) มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้วัสดุมีรูพรุนน้อยกว่าสูตรอื่นๆ ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสและร้อยละการยืด ณ จุดขาด จึงมีค่าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึมสูตรที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์ที่ใช้ทั้งสารช่วยผสม PE-g-MA และสารเชื่อมโยง DCP พบว่าผลการทดสอบต่างไปจากสมบัติเชิงกลของสูตรผสมที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์ (HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก c-HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติมแต่งบางชนิด เช่น เขม่าดำ Antioxidant สำหรับผลิตภัณฑ์ใช้งานกลางแจ้ง ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อหรือมีส่วนร่วมในการเชื่อมโยงทำให้ผลการทดสอบต่างไปจากสูตร HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP

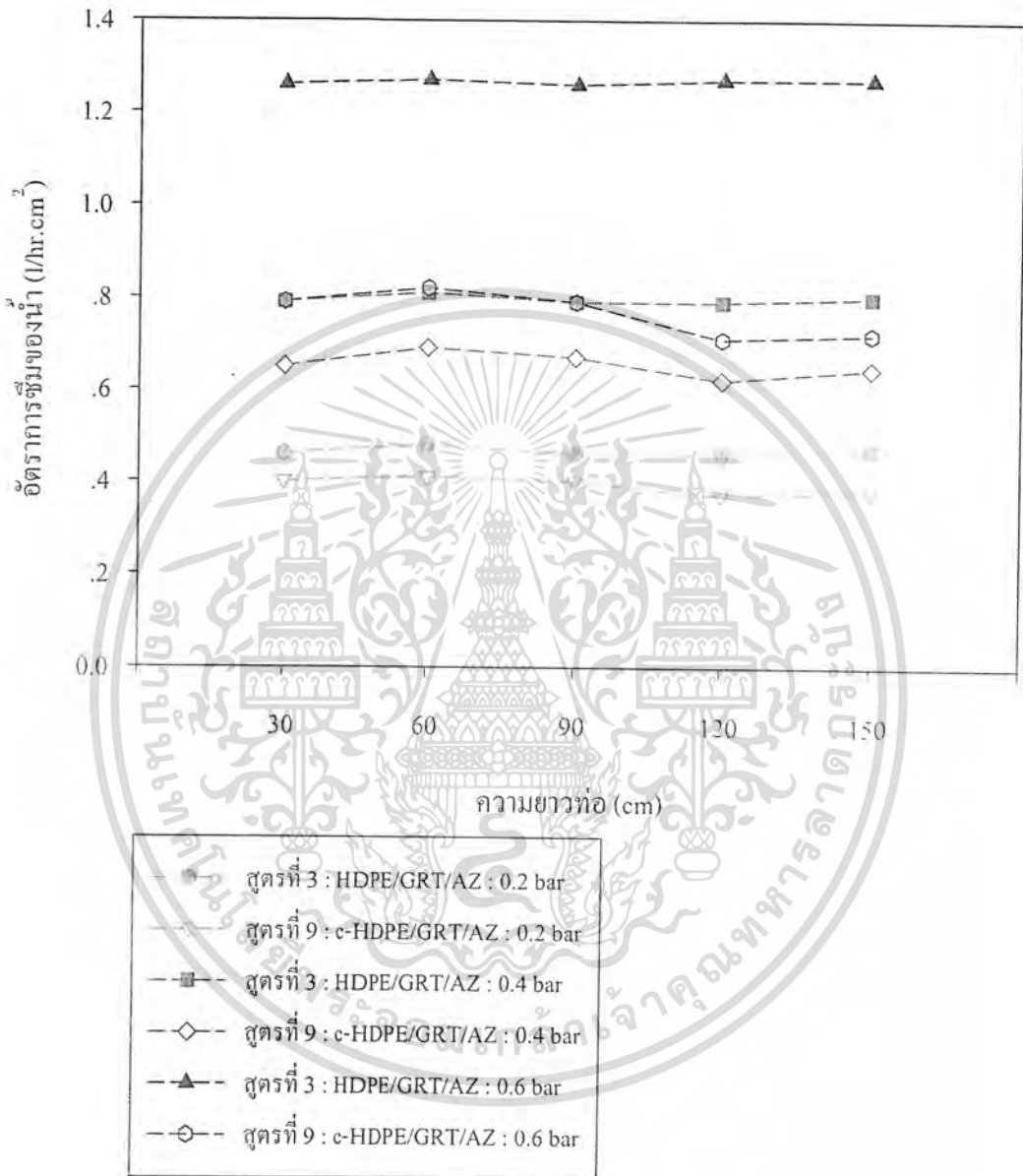
4.3 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำ

การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ สมบัติการซึมของน้ำต่อความยาวท่อและความดันลดของท่อที่น้ำขึ้น เพื่อศึกษาถึงสภาพที่นำไปใช้ในกรณีท่อส่งน้ำไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

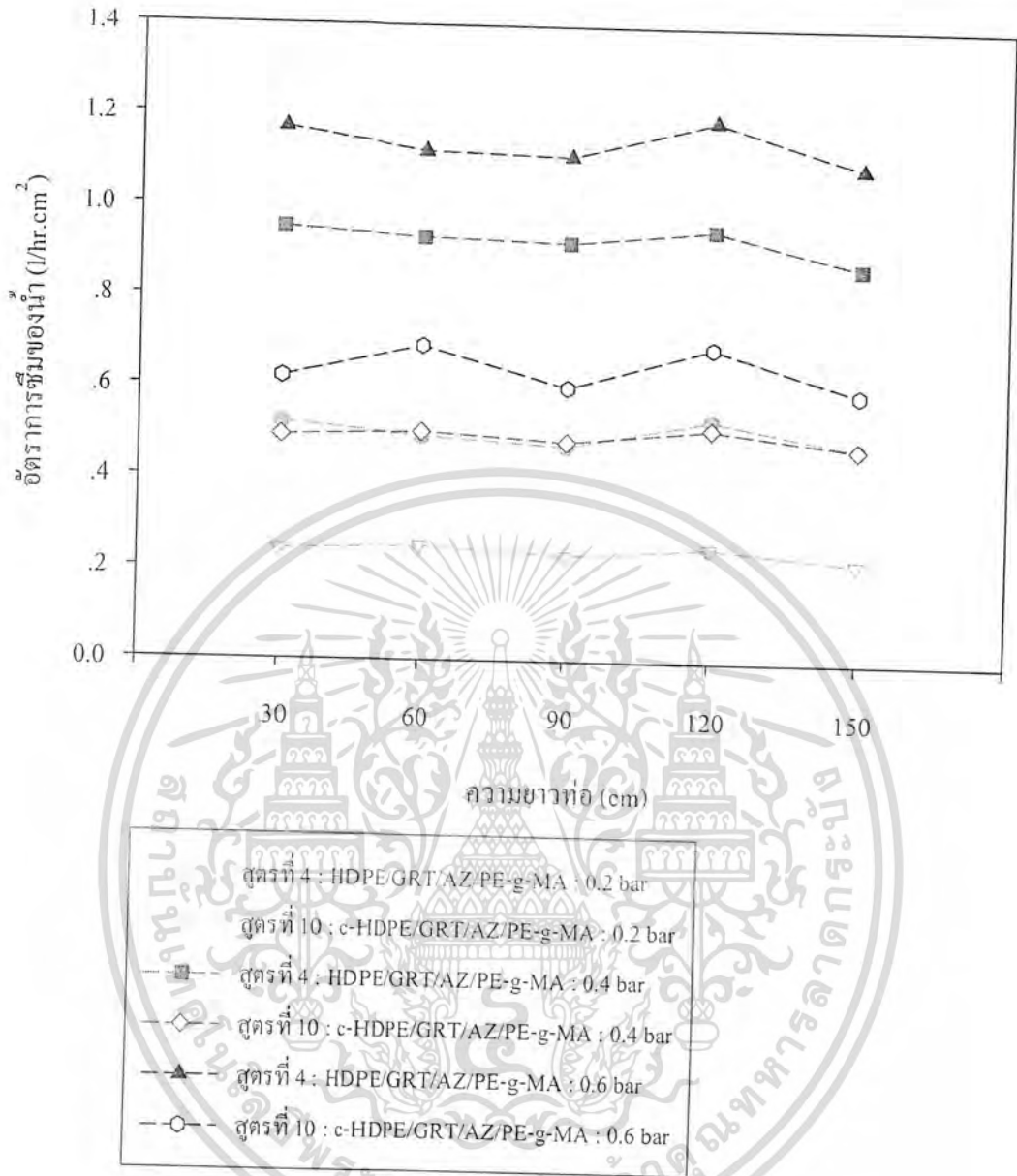
4.3.1 การศึกษาสมบัติการซึมของน้ำต่อความยาวท่อ

ศึกษาอัตราการซึมออกของน้ำต่อความยาวของท่อน้ำซึมที่เตรียมได้ เพื่อหาปริมาณน้ำที่ซึมออกมาต่อหน่วยเวลาต่อพื้นที่ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.9-4.19



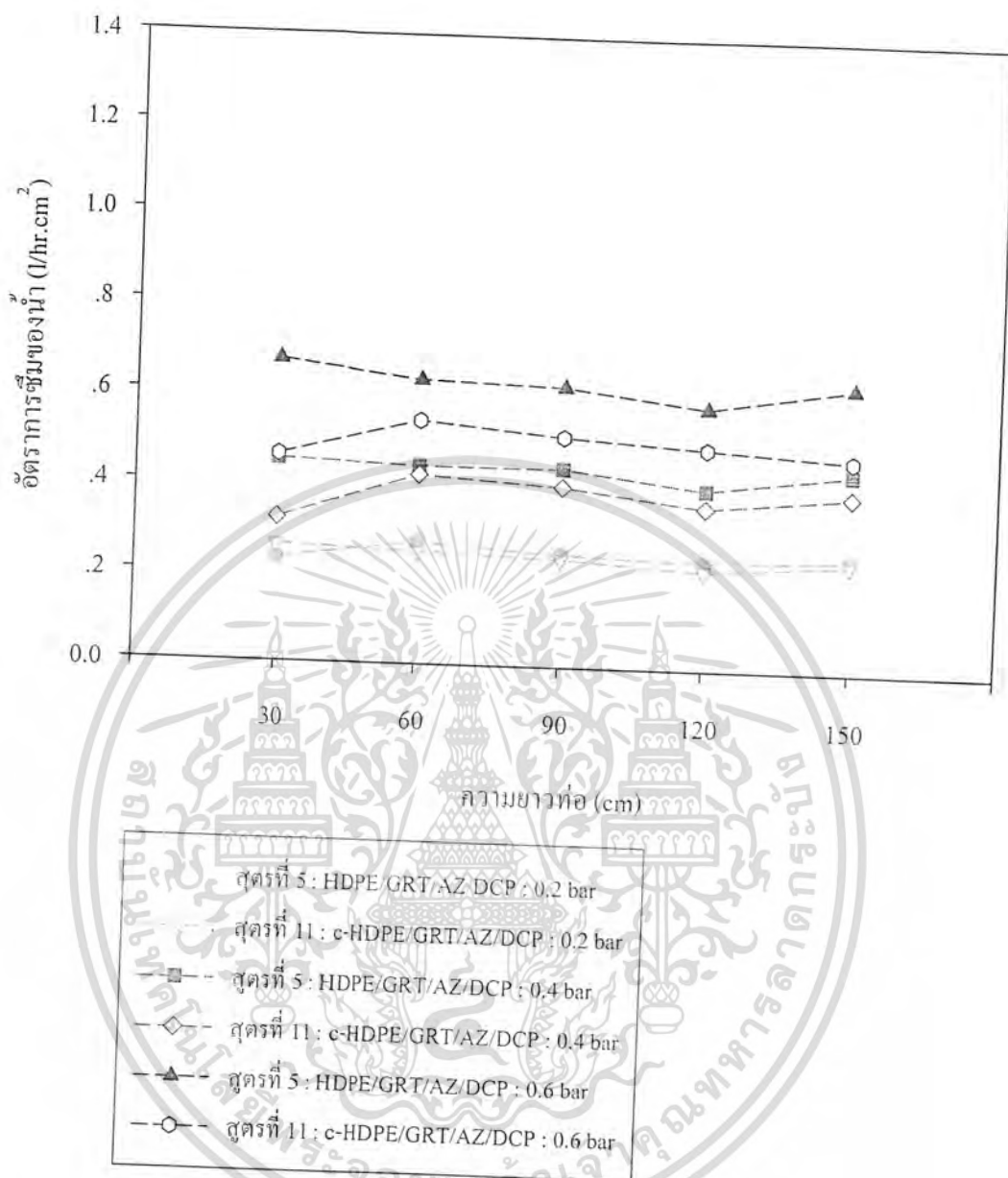
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ ที่ความดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



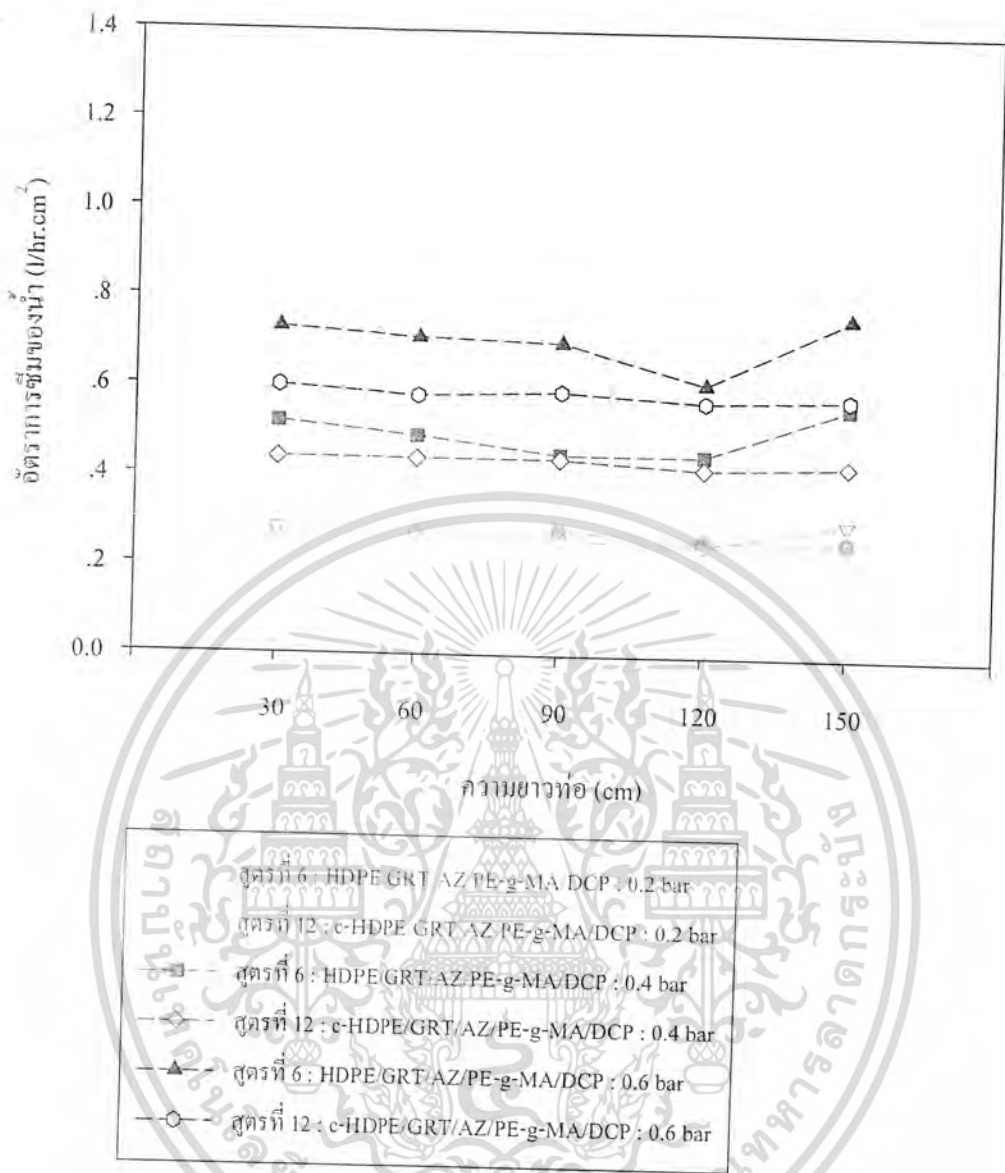
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA และ c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/DCP และ c-HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



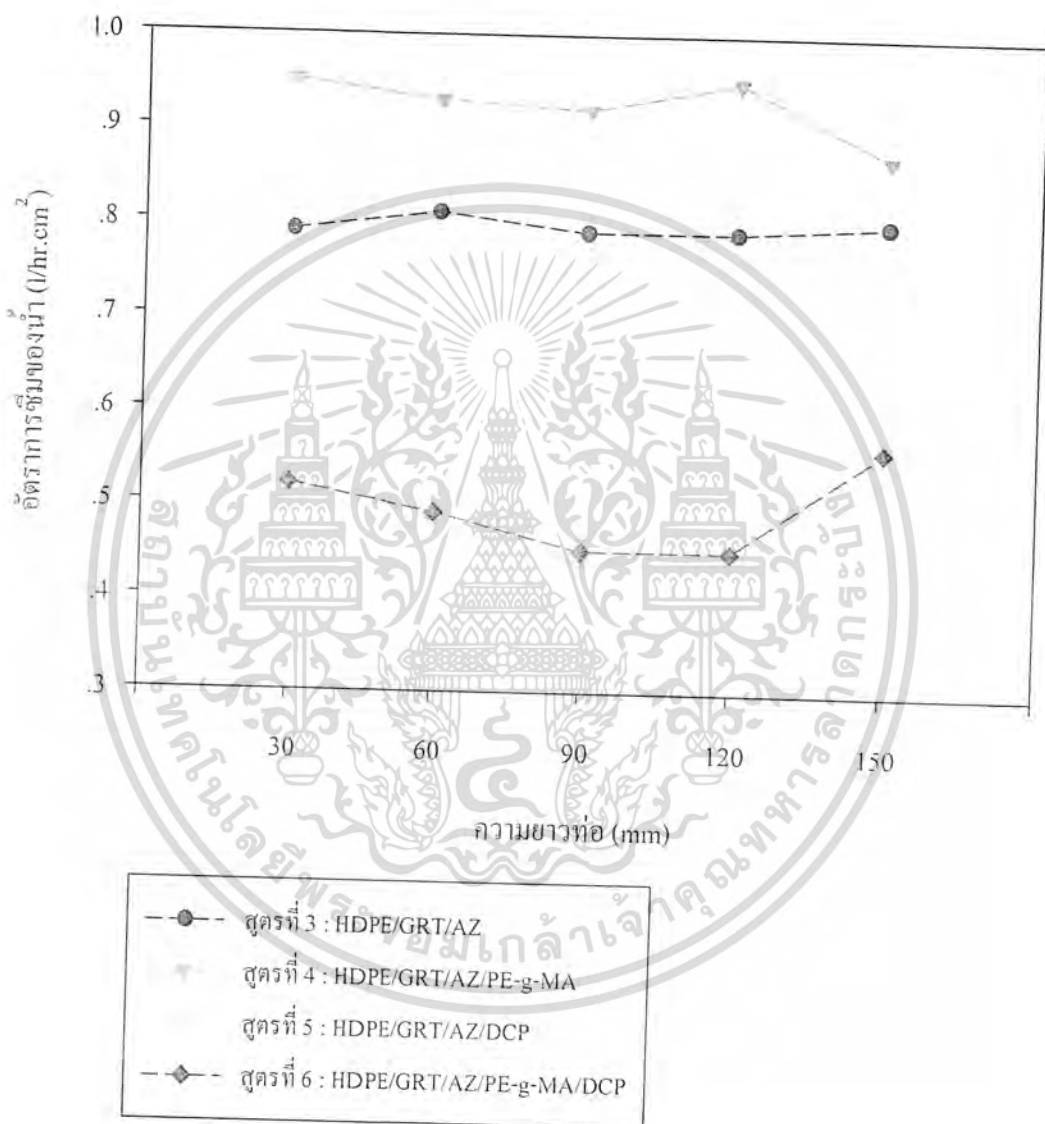
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของ HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP และ c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความดันต่างๆ

จากรูปที่ 4.9-4.12 เป็นการแสดงผลการทดลองจากการใช้ท่อน้ำซึมที่มีสูตรผสมเหมือนกัน แต่ใช้เม็ดรีซิ่น 2 ชนิดคือ HDPE และ c-HDPE พบว่าปริมาณน้ำที่ซึมออกมาในแต่ละช่วงความยาวของท่อมีความแตกต่างกันไม่มากนักและเมื่อมีการเพิ่มความดัน (ในช่วง 0.2-0.6 bar) ปริมาณน้ำที่ซึมออกมาเพิ่มขึ้นในทุกช่วงความยาวของท่อและไม่แตกต่างกันมากนักเช่นเดียวกันและเมื่อทำการเปรียบเทียบสูตรผสมที่ใช้เม็ดรีซิ่นต่างกัน คือ HDPE และ c-HDPE พบว่าในสูตรผสมที่ใช้ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเมตริกซ์ จะมีปริมาณน้ำที่ซึมออกมามากกว่าสูตรผสมที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของ c-HDPE มีมากกว่า HDPE ทำให้ระบบมีความหนืดสูง ขนาดของรูพรุนใน c-HDPE จึงมีขนาดเล็ก อัตราการซึมของน้ำจึงน้อยกว่าสูตรผสมที่ใช้ HDPE

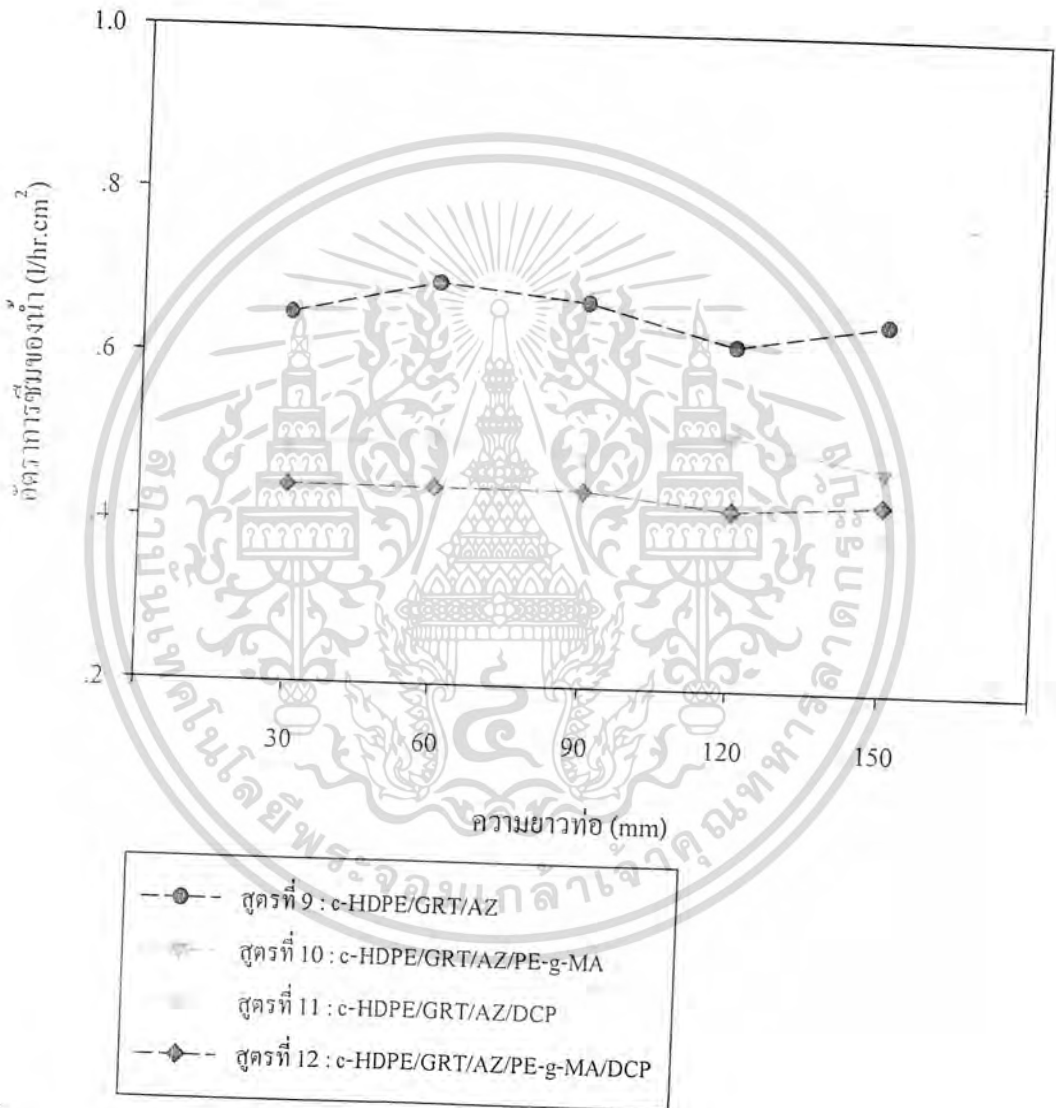
เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ซึมออกมาในสูตรผสมแต่ละเมตริกซ์ (ยกตัวอย่างที่ความดัน 0.4 bar) ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของสูตรผสมที่มี HDPE เป็นเมตริกซ์ ที่ความดัน 0.4 bar

จากรูปที่ 4.13 พบว่าในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA มีอัตราการซึมของน้ำมากที่สุด เนื่องจาก PE-g-MA มีสมบัติเป็นสารช่วยกระจายตัว ทำให้เกิดรูพรุนของเมทริกซ์มากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน รูพรุนที่เกิดขึ้นจึงมีการกระจายตัวที่ดีและเกิดรูพรุนมากขึ้น สำหรับสูตร HDPE/GRT/AZ อัตราการซึมของน้ำมีค่าน้อยกว่า เนื่องมาจากการกระจายตัวของอนุภาคผงยางรถยนต์ไม่ดีพอ ทำให้รูพรุนกระจายตัวได้ไม่ดี และในสูตร HDPE/GRT/AZ/DCP และสูตร HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP อัตราการซึมของน้ำมีค่าน้อยมาก เนื่องจาก DCP ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งขัดขวางการเกิดรูพรุน จึงทำให้อัตราการซึมของน้ำมีค่าลดลง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำและความยาวท่อของสูตรผสมที่มี c-HDPE เป็นเมทริกซ์ ที่ความดัน 0.4 bar

จากรูปที่ 4.14 พบว่าในสูตรที่มีแก้วใช้ c-HDPE เป็นเมทริกซ์ อัตราการซึมของน้ำมีค่าน้อย เนื่องจาก c-HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า HDPE เมื่อเติม PE-g-MA และ DCP ลงไปจึงทำให้สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมมีความหนืดสูงขึ้น รูพรุนจึงเกิดได้ยากขึ้น อัตราการซึมของน้ำจึงมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าท่อ น้ำซึมที่ผสมสารเชื่อมโยง DCP จะมีอัตราการซึมของน้ำน้อยกว่าสูตรที่ไม่มีใส่ DCP ซึ่งสอดคล้อง กับผลการทดลองที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์ (รูปที่ 4.13) ก่อนหน้านี้

สำหรับในสูตรที่ไม่มีการเติม AZ (HDPE/GRT และ c-HDPE/GRT) ไม่มีการทดสอบอัตรา การซึมน้ำเนื่องจากท่อที่ได้มีรูพรุนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นช่องว่างระหว่าง HDPE และอนุภาค ผงขารยอนต์ซึ่งเป็นเซลล์ปิด น้ำจึงไม่สามารถซึมออกมาได้ ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า การนำท่อที่ผลิตได้จากสูตร HDPE/GRT ไปทดสอบนั้น ไม่มีการซึมออกของน้ำ

4.3.2 การศึกษาความดันลดของท่อน้ำซึม

เนื่องจากความยาวท่อที่มีผลต่อความดันซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ซึมออกมาจากท่อ ท่อ น้ำซึมที่มีรูพรุนมากจะมีความดันลดมาก ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน เช่น ปริมาณน้ำที่ออกไม่ สม่าเสมอหรืออัตราการซึมน้ำค่ามากที่ปลายท่อหรือใช้ท่อยาวมากๆ ดังนั้นจึงเป็นการสมควรที่จะ ศึกษาหาความดันลด (Pressure drop) สัมพันธ์กับความยาวท่อ แสดงผลดังตารางที่ 4.2-4.4

ตารางที่ 4.2 ค่าความดันของท่อน้ำซึมที่ความยาวท่อต่างๆ เมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 0.2 bar

สูตรที่	สูตรผสม	ความยาวท่อ (cm)				
		30	60	90	120	150
3	HDPE/GRT/AZ	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20
6	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.20	0.20	0.20	0.22	0.21
9	c-HDPE/GRT/AZ	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.20	0.20	0.19	0.20	0.19
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20
12	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.20	0.21	0.20	0.19	0.19

หมายเหตุ สูตรที่ 1 2 7 และ 8 ไม่มีการใช้ AZ จึงไม่ได้มีการทดสอบสมบัติของท่อน้ำซึม

ตารางที่ 4.3 ค่าความดันของท่อน้ำซึมที่ความยาวท่อต่างๆ เมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 0.4 bar

สูตรที่	สูตรผสม	ความยาวท่อ (cm)				
		30	60	90	120	150
3	HDPE/GRT/AZ	0.40	0.40	0.40	0.39	0.38
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.40	0.40	0.40	0.40	0.38
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	0.40	0.39	0.40	0.40	0.41
6	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40
9	c-HDPE/GRT/AZ	0.40	0.40	0.39	0.40	0.40
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.40	0.40	0.40	0.39	0.40
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	0.40	0.40	0.39	0.38	0.40
12	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.40	0.40	0.38	0.40	0.39

ตารางที่ 4.4 ค่าความดันของท่อน้ำซึมที่ความยาวท่อต่างๆ เมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 0.6 bar

สูตรที่	สูตรผสม	ความยาวท่อ (cm)				
		30	60	90	120	150
3	HDPE/GRT/AZ	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	0.60	0.59	0.59	0.60	0.61
6	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.60	0.60	0.60	0.60	0.58
9	c-HDPE/GRT/AZ	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	0.60	0.60	0.61	0.60	0.59
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	0.60	0.60	0.60	0.59	0.59
12	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	0.60	0.60	0.59	0.61	0.60

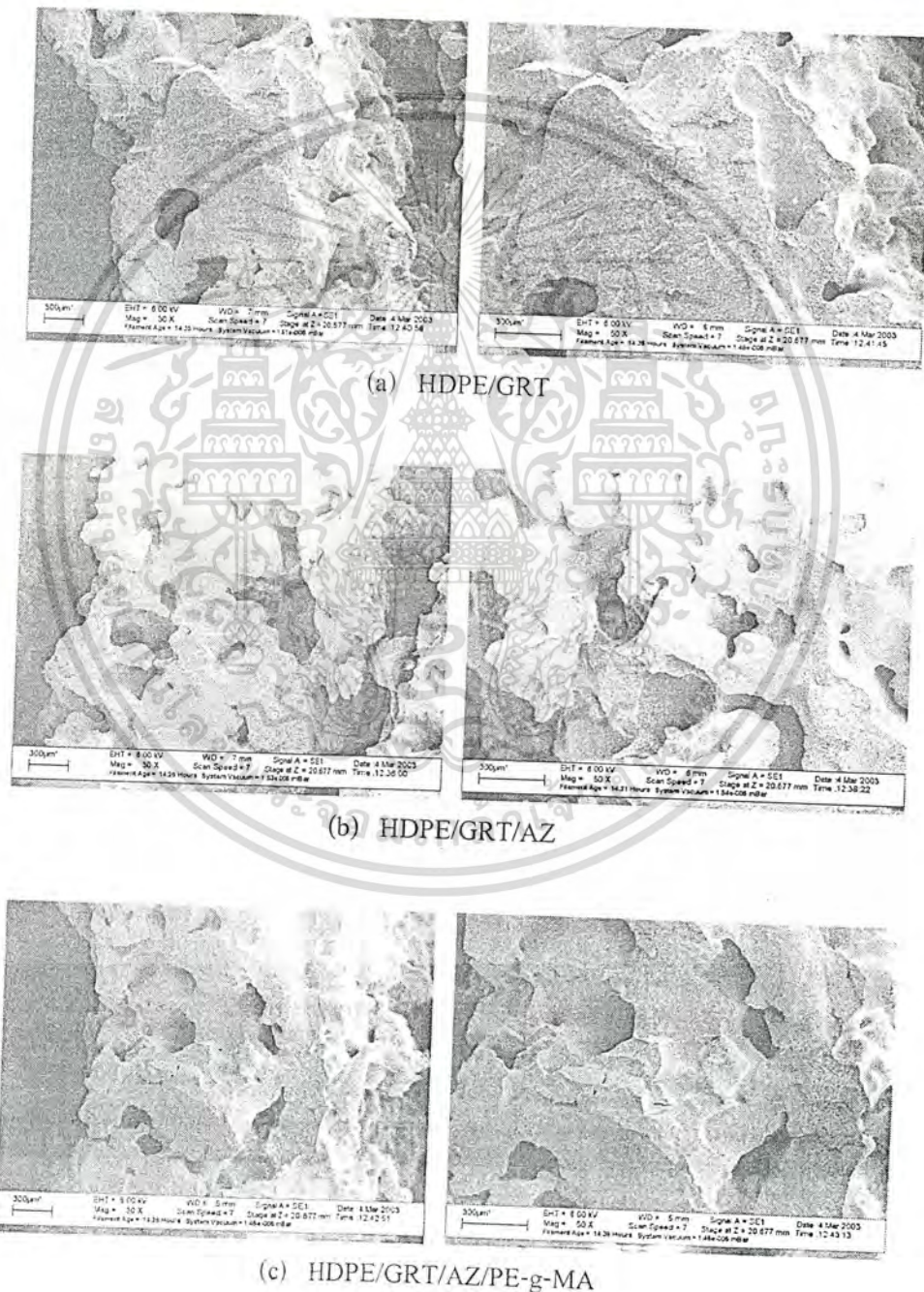
จากตารางที่ 4.2-4.4 พบว่าความดันในแต่ละช่วงเมื่อมีการเพิ่มความยาวของท่อน้ำซึมมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (ประมาณ ± 0.02 bar) อาจกล่าวได้ว่าค่าความดันลด (Pressure drop) ของท่อน้ำซึมเมื่อเพิ่มความยาวท่อน้ำซึมมีค่าน้อย อาจเป็นผลมาจากท่อที่ทดสอบมีความยาวค่อนข้างจำกัด (ความยาวสูงสุดที่ทดสอบคือ 150 cm) เนื่องจากกระบวนการผลิตสามารถผลิตท่อในงานวิจัยนี้มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

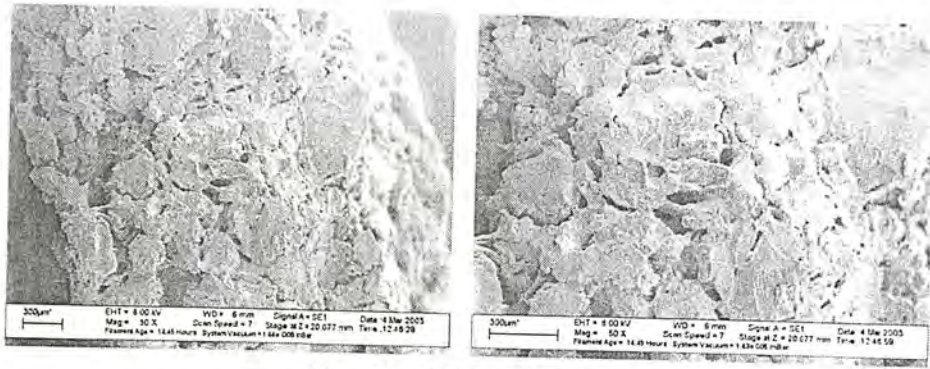
ยาวจำกัด ทำให้ความยาวของท่อในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อความดันในช่วง 0.2-0.6 bar ก็ยังไม่มีมีความดันลด (Pressure drop) เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

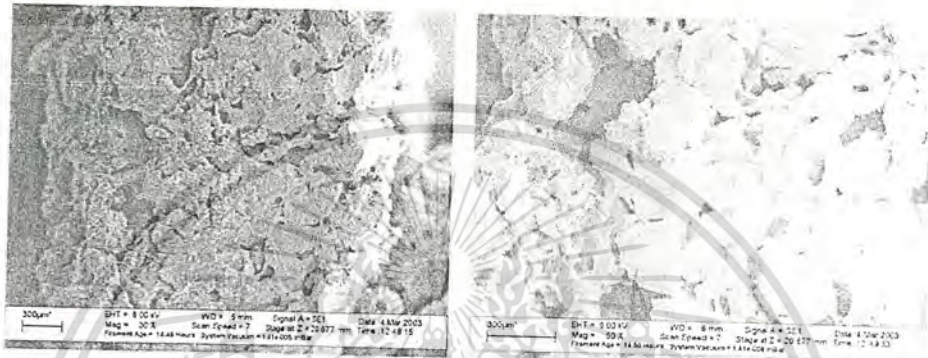
การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้เพื่อศึกษาขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ได้ผลการศึกษาคงรูปที่ 4.15 และ 4.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) HDPE/GRT/AZ/DCP



(e) HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP

รูปที่ 4.15 SEM micrograph แสดงลักษณะผิวหน้าของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำที่ใช้ HDPE เป็นเมทริกซ์ (รูปด้านซ้ายมีกำลังขยาย 30 เท่า และรูปด้านขวามีกำลังขยาย 50 เท่า)

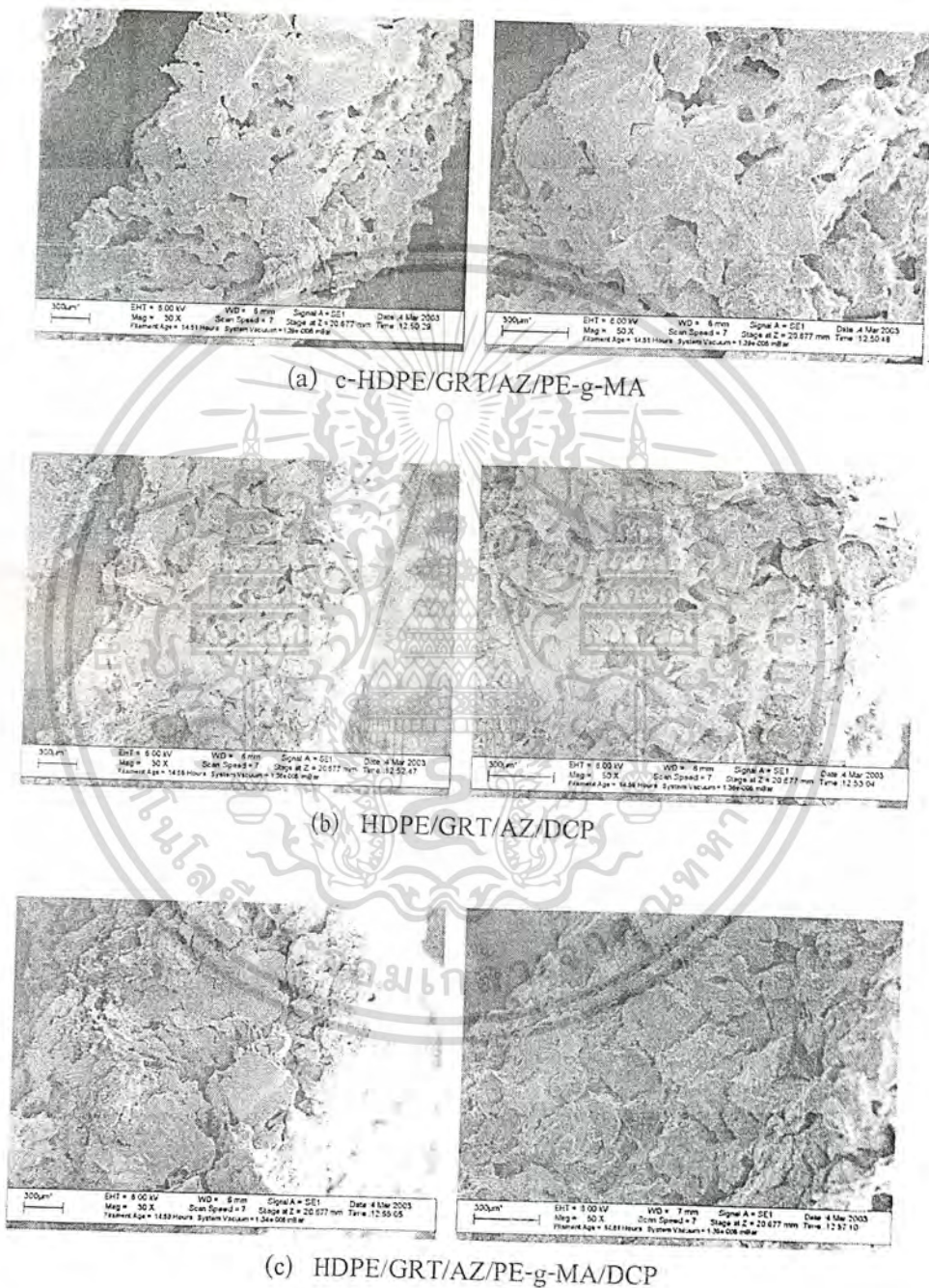
จากรูปที่ 4.15 (a)-(e) พบว่าสูตรผสม HDPE/GRT ซึ่งยังไม่มีสารเติมแต่งอื่น ๆ ลงไปนั้น HDPE และ GRT มีความสามารถในการผสมกันได้ดีค่อนข้างดี ซึ่งสังเกตได้จากพื้นผิวของท่อมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ก็มีช่องว่างเกิดขึ้นบ้างซึ่งเป็นช่องว่างระหว่าง HDPE และอนุภาคของผงยางรถยนต์ (GRT) หรือเป็นช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อน (Agglomerates) ของ GRT ที่ HDPE ไม่สามารถเข้าล้อมรอบ

เมื่อมีการเติมสารให้ฟอง AZ ลงไปในสูตรผสม HDPE/GRT พบว่าท่อที่ได้มีรูพรุนเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง ลักษณะของรูพรุนจะเป็นช่องว่างขนาดเล็กและกลม ซึ่งมีบางส่วนเชื่อมต่อกันทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นรูพรุนที่เป็ลออกสู่ภายนอกคือเป็นเซลล์เปิด (Open cell) ทำให้น้ำสามารถซึมออกมาได้

เมื่อเติม PE-g-MA ลงในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ พบว่ามีความสม่ำเสมอของขนาดรูพรุนและมีการกระจายของรูพรุนดีขึ้น เนื่องจาก PE-g-MA มีสมบัติเป็นสารช่วยกระจายตัว ทำให้อนุภาคของผงยางรถยนต์กระจายตัวดีขึ้นและไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน รูพรุนที่เกิดขึ้นจึงมีการกระจายตัวที่ดีและเกิดรูพรุนมากขึ้นทำให้น้ำซึมออกมาได้มาก อัตราการซึมของน้ำจึงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเติม DCP เพียงอย่างเดียวและเมื่อเติมทั้ง DCP และ PE-g-MA ลงในสูตรผสม HDPE/GRT/AZ พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลง อัตราการซึมของน้ำจึงลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการซึมของน้ำที่แสดงผลก่อนหน้านี



รูปที่ 4.16 SEM micrograph แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำที่ใช้ c-HDPE เป็นเมทริกซ์ (รูปด้านซ้ายมีกำลังขยาย 30 เท่า และรูปด้านขวามีกำลังขยาย 50 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 (a)-(c) พบว่าเมื่อเติม PE-g-MA ลงในสูตรผสม c-HDPE/GRT/AZ พบว่ามีความสม่ำเสมอของขนาดรูพรุนและมีการกระจายของรูพรุนดีขึ้น เนื่องจาก PE-g-MA มีสมบัติเป็นสารช่วยกระจายตัว ทำให้อุณหภูมิของผงยางรถยนต์กระจายตัวดีขึ้นและไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเนื่องจาก c-HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ระบบมีความหนืดมากขึ้น สารให้ฟองจึงไม่สามารถขยายตัวได้มากทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง น้ำจึงซึมออกมาได้น้อย อัตราการซึมของน้ำจึงน้อย

เมื่อเติม DCP เพียงอย่างเดียวและเมื่อเติมทั้ง DCP และ PE-g-MA ลงในสูตรผสม c-HDPE/GRT/AZ พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็ก อัตราการซึมของน้ำจึงลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการซึมของน้ำดังที่ได้กล่าวในผลการทดลองหัวข้อ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้การผลิตท่อน้ำดื่มที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) เพื่อศึกษาสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติการซึมของน้ำและสัญญาณวิทยา สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ทุกสูตรผสมทั้งที่เป็นสูตรผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับ พงยางรอยนต์ (GRT) และสูตรผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมเขม่าดำ (c-HDPE) กับ พงยางรอยนต์ (GRT) ทั้งที่มีและไม่มีสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆลงไปเพิ่ม พบว่าพฤติกรรมการไหลเป็น ซูโดพลาสติก และพบว่า c-HDPE มีค่าความหนืดสูงกว่า HDPE เนื่องจาก c-HDPE มีดัชนีการไหลต่ำกว่า HDPE เมื่อมีการผสมพงยางรอยนต์ (GRT) ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งลงไปจะทำให้ความหนืดของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมสารเติมแต่งอื่นๆลงไป พบว่าค่าความหนืดของของผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง
2. ผลของสารให้ฟอง AZ (สูตร HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น
3. การใช้สารช่วยผสม PE-g-MA ทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของ HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง อัตราการซึมของน้ำของสูตรผสมที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์ จะมีค่ามากขึ้น ส่วนค่าอัตราการซึมของน้ำของสูตรผสมที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์ จะมีค่าลดลง
4. การใช้สารเชื่อมโยง DCP ทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของ HDPE/GRT/AZ และ c-HDPE/GRT/AZ มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง อัตราการซึมของน้ำมีค่าลดลง
5. ในกรณีที่ใช้สารช่วยผสม PE-g-MA และสารเชื่อมโยง DCP ในสูตรผสมที่ใช้ HDPE เป็นเมตริกซ์ ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสส่วนและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด จึงมีค่าสูงที่สุด ในสูตรผสมที่ใช้ c-HDPE เป็นเมตริกซ์ พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และทุกสูตรผสมมีค่าอัตราการซึมของน้ำลดลง
6. การทดสอบการซึมของน้ำ พบว่าการเพิ่มความดันของน้ำทำให้อัตราการซึมของน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มความยาวของท่อ (ความยาว 30-150 cm) อัตราการซึมของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำและความดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าไม่มีความดันลดเกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากความยาวของท่อที่ใช้ทดสอบน้อยเกินไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ไปใช้งานจริงกับงานทางด้านเกษตรกรรม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการให้น้ำ และผลของอัตราการซึมของน้ำที่เหมาะสมกับดินไม้หรือแปลงผักสวนครัว
2. ทำการผลิตท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและความหนาของท่อต่างๆกัน
3. ศึกษาสมบัติอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) สมบัติความคงทนต่อการใช้งาน (Aging properties)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. John S., **Polymer Recycling : Science, Technology and Application.** John Wiley & Sons : Chichester, Inc., 1998. pp. 412-426
2. Klingensmith W., Baranwal K., **Rubber World**, vol. 41, 1998. pp. 28
3. สุขวัฒน์และคณะ. ยางพารา. ปีที่ 19. ฉบับที่ 2. พฤษภาคม-สิงหาคม 2542 หน้า 124-125
4. คณัมพร สวัสดิ์ชุมพล จงจิตร ตาภิกรชัยและฉัตรนิษฐ์ ชันทอง. การปรับปรุงสมบัติของน้ำขี้มจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น. โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
5. สัจจะชัย สัจจะธนะกุล. การศึกษาที่อนำขี้มจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
6. โฉลก ปิงตระกูล. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย บริษัท วิศวดอร์เพาเวอร์พอยท์ 2526 หน้า 59-66
7. อธิธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
8. Mark E., **Science and Technology of Rubber.** 2nd Ed. New York : Academic Press , Inc., 1994
9. Makarov V.M., Drozdovski V.F., **Reprocessing of Tyres and Rubber Wastes Recycling from the Rubber Products Industry.** Ellis Horwood, 1991
10. Daniel K. and Kurt C.F., **Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology,** 1994. pp. 376-408
11. Methven J.M., **Foams and Blowing Agents.** Review Report 25 vol.3, no. 1, 1989. pp. 996
12. Brydson J.A., **Plastics Material.** 7th Ed. London, 1999. pp. 151
13. ชลตดา ฤตวิรุฬห์. เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. พอลิเมอร์เชิงพาณิชย์. กรุงเทพมหานคร : โอเอสพรีนติ้งเฮาส์ 2526
15. สุภารัตน์ รักชลธิ. เอกสารประกอบการเรียนวิชาการวัดพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
16. Rosand Precision Ltd., คู่มือการใช้เครื่องทดสอบสมบัติการไหล Rosand Rheometer Type Rh 7/2, England.
17. บรรเลง สรนิล. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพมหานคร : ดวงกมลสมัย 2540
18. Burgoyne M.D., Leaker., and Krekic Z., *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 49, no. 49, 1976. pp. 375-378
19. Sawant A.B., Kale D.D., *Popular Plastics and Packaging*, September 1996. pp. 77-80
20. Pramanik P.K., Baker W.E., *Plastics, Rubber and Composites Processing and Application*, vol. 24, no. 4, 1995. pp. 229-237
21. Kowalska E., Wielgosz Z., *Polymer Recycling*, vol. 2, no. 3, 1996. pp. 213-219
22. Rajalingam P., Sharpe J., and Baker W.E., *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 66, 1995. pp. 664-677
23. Kim J.K., Burford R.P., *J. Rubber Chemistry and Technology*, vol. 71, 1997. pp. 1028-1041
24. *Annual Book of ASTM Standard 8.03*, 1996. pp. 458-468
25. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมท่ออย่างดูดและส่งน้ำ มอก. 746-2530. กระทบรวมอุตสาหกรรม 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติการไหลของสูตรผสม

ตาราง ก-1 สมบัติการไหลของ HDPE

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	1.22	0.03	37.30	9947
7.50	2.05	0.11	60.76	8101
18.75	3.88	0.36	110.00	5867
37.50	5.98	0.69	165.36	4410
187.50	13.61	2.44	349.06	1862
375.00	17.86	3.70	442.50	1180
562.50	20.15	4.64	484.72	862
750.00	19.76	5.55	444.00	592

หมายเหตุ PI : ความดันที่อ่านได้จากหัวฉายที่มีความยาว 16 mm

Po : ความดันที่อ่านได้จากหัวฉายที่มีความยาว 0 mm

ตาราง ก-2 สมบัติการไหลของ HDPE/GRI

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	4.20	0.64	111.30	29680
7.50	5.74	0.98	148.90	19853
18.75	9.17	1.69	233.86	12473
37.50	12.12	2.43	302.90	8077
187.50	21.09	5.46	488.36	2605
375.00	21.99	7.02	467.80	1247
562.50	22.45	8.01	451.18	802
750.00	22.94	8.25	459.02	512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 สมบัติการไหลของ HDPE/GRT/AZ

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	5.54	0.68	151.80	40480
7.50	5.65	0.67	155.44	20725
18.75	9.67	0.76	278.30	14843
37.50	13.56	0.83	397.74	10606
187.50	19.76	5.41	448.48	2392
375.00	18.57	6.82	367.22	980
562.50	17.08	7.92	286.32	509
750.00	18.97	8.25	335.12	447

ตาราง ก-4 สมบัติการไหลของ HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	5.00	0.79	131.70	35120
7.50	5.22	0.73	140.22	18696
18.75	7.86	0.68	224.27	11961
37.50	11.75	0.70	345.43	9211
187.50	18.43	0.77	551.99	2944
375.00	18.56	5.73	401.11	1070
562.50	16.66	6.65	313.07	557
750.00	17.44	7.42	313.42	418

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-5 สมบัติการไหลของ c-HDPE

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	2.60	0.47	66.56	17749
7.50	3.40	0.64	86.16	11488
18.75	4.74	0.98	117.64	6274
37.50	6.11	1.36	148.28	3954
187.50	10.34	2.92	231.74	1236
375.00	12.86	4.03	276.02	736
562.50	14.56	4.85	303.50	540
750.00	15.79	5.45	323.20	431

ตาราง ก-6 สมบัติการไหลของ c-HDPE/GRT

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	5.40	1.12	113.56	30283
7.50	6.58	1.49	159.18	21224
18.75	8.71	2.16	204.86	10926
37.50	10.38	2.84	235.92	6291
187.50	15.96	5.14	338.24	1804
375.00	18.80	6.60	381.24	1017
562.50	20.30	7.30	406.42	723
750.00	21.72	7.80	435.08	580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-7 สมบัติการไหลของ c-HDPE/GRT/AZ

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	5.62	1.75	121.16	32309
7.50	6.83	1.80	157.22	20963
18.75	8.60	1.95	207.64	11074
37.50	10.80	2.58	256.80	6848
187.50	15.63	4.96	333.52	1779
375.00	18.21	6.19	375.84	1002
562.50	19.72	6.85	402.22	715
750.00	20.84	7.41	419.56	559

ตาราง ก-8 สมบัติการไหลของ c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA

Shear rate (s^{-1})	PI (MPa)	Po (MPa)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)
3.75	5.53	1.63	112.35	29960
7.50	6.43	1.91	141.30	18840
18.75	8.70	2.01	209.30	11163
37.50	10.74	2.27	264.76	7060
187.50	15.91	4.77	348.26	1857
375.00	18.51	5.97	392.08	1046
562.50	20.19	6.61	424.27	754
750.00	20.96	7.04	434.93	580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม

ตาราง ข-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด และเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี HDPE เป็นเมตริกซ์

สูตร ที่	สูตรผสม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (%)							
		ภายใต้แรงกด				หลังคลายแรงกด			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
2	HDPE/GRT	97.00	99.00	99.02	98.34	98.28	99.00	99.77	99.02
3	HDPE/GRT/AZ	97.24	97.92	99.05	98.07	98.06	98.56	99.53	98.72
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	94.11	96.43	97.94	96.16	97.22	98.38	99.68	98.43
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	96.30	93.95	98.71	96.32	98.71	98.41	99.35	98.82
6	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	96.62	94.70	94.08	95.13	99.19	99.52	99.04	99.25

ตาราง ข-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกภายใต้แรงกด และเมื่อคลายแรงกดออกของท่อน้ำซึมที่มี c-HDPE เป็นเมตริกซ์

สูตร ที่	สูตรผสม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (%)							
		ภายใต้แรงกด				หลังคลายแรงกด			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
8	c-HDPE/GRT	97.93	96.46	98.52	97.64	99.52	99.52	99.51	99.52
9	c-HDPE/GRT/AZ	95.16	99.18	96.90	97.08	98.87	99.51	99.02	99.13
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	97.72	98.18	98.18	98.03	99.67	99.01	100.0	99.56
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	98.18	96.64	97.71	97.51	99.83	99.52	98.86	99.40
12	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	97.27	98.17	96.07	97.17	99.84	99.67	99.53	99.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa) ของท่อน้ำซึม

สูตร ที่	สูตรผสม	ชั้นงานที่							
		1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	Std dev
1	HDPE	104.10	97.12	100.41	95.32	98.25	102.62	99.64	3.36
2	HDPE/GRT	2.95	3.24	2.92	2.96	3.00	3.26	3.05	0.16
3	HDPE/GRT/AZ	2.02	2.12	2.06	2.66	2.03	2.08	2.16	0.25
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	1.97	2.07	2.71	2.46	1.94	2.31	2.54	0.31
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	2.45	2.61	3.69	2.03	2.34	2.66	2.63	0.23
6	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	3.93	4.55	4.70	3.41	5.03	4.58	4.37	0.59
7	c-HDPE	78.89	81.11	80.83	85.45	76.61	81.68	80.76	2.96
8	c-HDPE/GRT	3.45	3.73	3.64	3.86	3.33	3.55	3.59	0.19
9	c-HDPE/GRT/AZ	2.51	2.67	2.50	2.47	2.54	2.60	2.55	0.07
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	1.80	2.17	2.16	2.26	1.97	2.43	2.73	0.22
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	2.38	2.87	3.09	2.17	3.09	3.00	2.77	0.39
12	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP	1.70	1.64	1.91	2.09	2.13	2.45	1.99	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-4 ค่ามอดุลัส (Modulus, MPa) ของท่อน้ำซึม

สูตร ที่	สูตรผสม	ชั้นงานที่							
		1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	Std dev
1	HDPE	821.36	790.57	803.24	839.50	788.69	801.37	807.50	19.56
2	HDPE/GRT	22.62	24.52	20.97	25.26	22.31	21.36	22.84	1.71
3	HDPE/GRT/AZ	16.18	15.78	15.29	16.04	14.98	15.42	15.62	0.46
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	17.72	16.84	17.23	18.65	17.54	17.31	17.55	0.91
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	21.95	19.72	19.87	18.99	19.86	18.45	19.81	1.19
6	HDPE/GRT/AZ/ PE-g-MA/DCP	32.47	33.46	32.60	31.89	30.90	30.13	31.91	1.21
7	c-HDPE	529.50	502.61	525.70	514.35	501.45	524.62	516.37	12.19
8	c-HDPE/GRT	24.37	28.41	29.98	30.55	34.15	27.06	29.09	3.33
9	c-HDPE/GRT/AZ	17.15	22.62	21.11	20.54	16.63	18.04	19.35	2.41
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	24.62	19.95	20.64	18.88	18.71	22.97	20.96	2.36
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	21.09	23.14	22.31	19.26	20.27	23.45	21.59	1.66
12	c-HDPE/GRT/AZ/ PE-g-MA/DCP	17.02	15.32	16.07	16.29	17.56	17.54	16.66	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-5 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, %) ของท่อน้ำซึม

สูตร ที่	สูตรผสม	ชั้นงานที่						เฉลี่ย	Std dev
		1	2	3	4	5	6		
1	HDPE	592.10	578.26	599.14	571.32	586.28	589.41	586.10	9.97
2	HDPE/GRT	33.32	45.72	45.06	44.58	40.66	51.72	43.51	6.13
3	HDPE/GRT/AZ	44.90	47.36	38.10	60.70	37.37	50.55	46.50	8.66
4	HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	35.70	40.97	49.36	50.72	40.23	44.37	43.56	5.75
5	HDPE/GRT/AZ/DCP	47.82	45.22	46.59	48.73	49.57	44.92	47.14	1.89
6	HDPE/GRT/AZ/ PE-g-MA/DCP	90.21	88.13	82.24	86.37	87.26	86.85	86.84	2.63
7	c-HDPE	52.60	51.84	48.93	52.97	50.12	49.37	50.97	1.72
8	c-HDPE/GRT	39.32	42.51	43.78	48.59	43.65	50.86	44.97	4.21
9	c-HDPE/GRT/AZ	52.49	54.24	55.35	51.28	51.64	54.79	53.30	1.72
10	c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA	34.72	38.33	48.58	44.60	34.99	47.80	41.50	6.29
11	c-HDPE/GRT/AZ/DCP	43.17	40.35	43.35	45.28	47.31	40.25	43.29	2.76
12	c-HDPE/GRT/AZ/ PE-g-MA/DCP	29.21	30.58	24.66	26.54	24.81	27.74	27.26	2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติการซึมของน้ำ

ตาราง ก-1 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม HDPE/GRT/AZ ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.46	0.45	0.46	0.46	0.79	0.80	0.79	0.79	1.27	1.26	1.26	1.26
60	0.48	0.49	0.48	0.48	0.80	0.81	0.81	0.81	1.27	1.27	1.27	1.27
90	0.46	0.45	0.47	0.46	0.79	0.79	0.79	0.79	1.26	1.25	1.26	1.26
120	0.46	0.47	0.46	0.46	0.79	0.81	0.78	0.79	1.27	1.27	1.28	1.27
150	0.47	0.49	0.46	0.47	0.79	0.81	0.80	0.80	1.27	1.25	1.28	1.27

ตาราง ก-2 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.52	0.51	0.53	0.52	0.95	0.94	0.95	0.95	1.18	1.15	1.18	1.17
60	0.49	0.48	0.49	0.49	0.91	0.94	0.93	0.93	1.14	1.10	1.13	1.12
90	0.47	0.47	0.47	0.47	0.90	0.94	0.92	0.92	1.11	1.12	1.11	1.11
120	0.53	0.53	0.53	0.53	0.95	0.93	0.96	0.95	1.20	1.19	1.18	1.19
150	0.47	0.48	0.47	0.47	0.86	0.89	0.87	0.87	1.09	1.08	1.09	1.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความยาวท่อ และความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.23	0.24	0.23	0.23	0.45	0.44	0.46	0.45	0.67	0.67	0.67	0.67
60	0.27	0.25	0.28	0.27	0.44	0.45	0.43	0.44	0.63	0.63	0.64	0.63
90	0.24	0.26	0.25	0.25	0.44	0.43	0.46	0.44	0.62	0.62	0.61	0.62
120	0.21	0.25	0.25	0.24	0.40	0.39	0.40	0.40	0.58	0.57	0.59	0.58
150	0.24	0.25	0.25	0.25	0.44	0.45	0.44	0.44	0.63	0.62	0.63	0.63

ตาราง ก-4 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.28	0.27	0.28	0.28	0.52	0.51	0.52	0.52	0.72	0.73	0.74	0.73
60	0.27	0.27	0.27	0.27	0.49	0.51	0.48	0.49	0.71	0.71	0.70	0.71
90	0.28	0.26	0.29	0.28	0.45	0.43	0.47	0.45	0.70	0.71	0.69	0.70
120	0.26	0.25	0.26	0.26	0.44	0.46	0.45	0.45	0.61	0.61	0.61	0.61
150	0.25	0.26	0.26	0.26	0.56	0.57	0.56	0.56	0.76	0.73	0.79	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-5 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.40	0.40	0.39	0.40	0.64	0.65	0.66	0.65	0.79	0.76	0.81	0.79
50	0.40	0.42	0.41	0.41	0.69	0.69	0.68	0.69	0.82	0.81	0.82	0.82
90	0.40	0.41	0.40	0.40	0.65	0.69	0.67	0.67	0.79	0.79	0.79	0.79
120	0.38	0.37	0.37	0.37	0.61	0.63	0.62	0.62	0.70	0.72	0.71	0.71
150	0.38	0.38	0.38	0.38	0.65	0.67	0.64	0.65	0.72	0.72	0.71	0.72

ตาราง ก-6 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.24	0.25	0.23	0.24	0.49	0.50	0.49	0.49	0.62	0.63	0.62	0.62
60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.61	0.61	0.61	0.61
90	0.25	0.22	0.23	0.23	0.48	0.48	0.49	0.48	0.62	0.59	0.58	0.60
120	0.25	0.26	0.24	0.25	0.51	0.50	0.52	0.51	0.68	0.70	0.69	0.69
150	0.22	0.22	0.23	0.22	0.45	0.48	0.48	0.47	0.59	0.59	0.58	0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-7 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความยาวท่อ และความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.26	0.25	0.26	0.26	0.32	0.31	0.32	0.32	0.46	0.45	0.46	0.46
60	0.25	0.26	0.24	0.25	0.41	0.42	0.42	0.42	0.54	0.54	0.53	0.54
90	0.25	0.23	0.24	0.24	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.52	0.51	0.51
120	0.21	0.22	0.22	0.22	0.36	0.35	0.35	0.36	0.49	0.52	0.47	0.49
150	0.23	0.25	0.24	0.24	0.40	0.39	0.39	0.39	0.48	0.48	0.46	0.47

ตาราง ค-8 ค่าอัตราการซึมของน้ำ ($l/hr.cm^2$) ของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความยาวท่อและความดันต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.29	0.28	0.27	0.28	0.42	0.46	0.44	0.44	0.59	0.61	0.60	0.60
60	0.27	0.27	0.28	0.27	0.43	0.44	0.44	0.44	0.58	0.58	0.57	0.58
90	0.25	0.26	0.26	0.26	0.44	0.45	0.44	0.44	0.60	0.59	0.58	0.59
120	0.26	0.24	0.25	0.25	0.42	0.41	0.42	0.42	0.57	0.57	0.58	0.57
150	0.31	0.30	0.30	0.30	0.41	0.45	0.43	0.43	0.58	0.57	0.59	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-9 ค่าความดันของท่อน้ำซีม HDPE/GRT/AZ ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.19	0.20	0.20	0.40	0.39	0.40	0.40	0.59	0.60	0.60	0.60
90	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.39	0.40	0.60	0.60	0.59	0.60
120	0.20	0.20	0.19	0.20	0.40	0.38	0.39	0.39	0.60	0.60	0.60	0.60
150	0.19	0.19	0.19	0.19	0.39	0.38	0.38	0.38	0.58	0.59	0.60	0.59

ตาราง ค-10 ค่าความดันของท่อน้ำซีม HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.20	0.19	0.20	0.39	0.40	0.40	0.40	0.59	0.60	0.60	0.60
90	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.39	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
120	0.19	0.19	0.19	0.19	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.59	0.60	0.60
150	0.18	0.19	0.20	0.19	0.38	0.38	0.38	0.38	0.59	0.60	0.58	0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-11 ค่าความดันของท่อน้ำซีม HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.20	0.19	0.20	0.40	0.38	0.39	0.39	0.59	0.59	0.58	0.59
90	0.19	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.59	0.58	0.59	0.59
120	0.21	0.20	0.21	0.21	0.39	0.40	0.40	0.40	0.59	0.60	0.61	0.60
150	0.20	0.20	0.20	0.20	0.41	0.40	0.41	0.41	0.61	0.61	0.60	0.61

ตาราง ก-12 ค่าความดันของท่อน้ำซีม HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.59	0.60	0.60	0.60
60	0.19	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.39	0.40	0.60	0.59	0.60	0.60
90	0.20	0.20	0.19	0.20	0.41	0.41	0.40	0.41	0.60	0.60	0.60	0.60
120	0.21	0.22	0.22	0.22	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.59	0.60	0.60
150	0.20	0.21	0.21	0.21	0.40	0.40	0.40	0.40	0.58	0.59	0.60	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-13 ค่าความดันของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.19	0.20	0.20	0.40	0.39	0.40	0.40	0.60	0.59	0.60	0.60
90	0.19	0.20	0.20	0.20	0.39	0.39	0.39	0.39	0.59	0.60	0.60	0.60
120	0.20	0.21	0.20	0.21	0.40	0.39	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
150	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.39	0.40	0.59	0.59	0.58	0.59

ตาราง ก-14 ค่าความดันของท่อน้ำซึม c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.19	0.20	0.20	0.39	0.40	0.40	0.40	0.60	0.59	0.60	0.60
90	0.20	0.18	0.19	0.19	0.40	0.39	0.40	0.40	0.59	0.61	0.61	0.61
120	0.20	0.19	0.20	0.20	0.39	0.39	0.38	0.39	0.60	0.59	0.60	0.60
150	0.19	0.18	0.19	0.19	0.40	0.39	0.40	0.40	0.59	0.59	0.58	0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-15 ค่าความดันของท่อน้ำซีมี c-HDPE/GRT/AZ/DCP ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.19	0.20	0.40	0.40	0.39	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.59	0.60	0.60	0.60
90	0.20	0.21	0.21	0.21	0.39	0.39	0.39	0.39	0.60	0.58	0.61	0.60
120	0.20	0.20	0.19	0.20	0.38	0.37	0.38	0.38	0.58	0.60	0.59	0.59
150	0.20	0.19	0.20	0.20	0.40	0.39	0.40	0.40	0.60	0.59	0.59	0.59

ตาราง ก-16 ค่าความดันของท่อน้ำซีมี c-HDPE/GRT/AZ/PE-g-MA/DCP ที่ความยาวท่อต่างๆ

ความยาวท่อ (cm)	ความดัน (bar)											
	0.2				0.4				0.6			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
60	0.21	0.21	0.20	0.21	0.40	0.40	0.39	0.40	0.59	0.60	0.60	0.60
90	0.20	0.20	0.20	0.20	0.38	0.38	0.38	0.38	0.58	0.59	0.60	0.59
120	0.19	0.19	0.19	0.19	0.40	0.39	0.40	0.40	0.60	0.61	0.61	0.61
150	0.20	0.18	0.19	0.19	0.39	0.39	0.39	0.39	0.60	0.60	0.59	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้