

การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำดื่มจากผงยางรถยนต์
กับพอลิไวนิลคลอไรด์

STUDY OF POROUS WATER PIPES PRODUCED FROM GROUND
RUBBER TYRES AND POLY (VINYL CHLORIDE)

กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ
KANYANEE SEANGKIATYUTH

วิทยานิพนธ์ชิ้นนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-618-7

การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซีเมนต์จากผงยางรถยนต์
กับพอลิไวนิลคลอไรด์

STUDY OF POROUS WATER PIPES PRODUCED FROM GROUND
RUBBER TYRES AND POLY(VINYL CHLORIDE)

กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ
KANYANEE SEANGKIATYUTH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...43293
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2545
ISBN 974-648-618-7

STUDY OF POROUS WATER PIPES PRODUCED FROM GROUND
RUBBER TYRES AND POLY(VINYL CHLORIDE)

KANYANEE SEANGKIATYUTH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN PETROCHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-648-618-7

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซีมจาก ผงยางรถยนต์กับพอลิไวนิลคลอไรด์
นักศึกษา	นางสาวกัญญาณี แสงเกียรติยุทธ
รหัสประจำตัว	42061202
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมปิโตรเคมี
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซีมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Ground Rubber Tyres, GRT) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้ไดออกทิลฟทาเลต (Diocetyl phthalate, DOP) เป็นพลาสติกไซเซอร์ เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent) และซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้น (Kicker) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซีมที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลที่ดี โดยนำผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาบดละเอียด และใช้เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) และเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแบบจำลองท่อน้ำซีมเป็นแผ่นมีความหนา 0.35 ซม. ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression moulding machine) ปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษา ได้แก่ สภาวะการขึ้นรูป ปริมาณไดออกทิลฟทาเลต ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพีวีซี ผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ต่อการสลายตัวของสารให้ฟอง และขนาดผงยางรถยนต์ จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และฐานฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซีม คือ อุณหภูมิการกดอัด 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ปริมาณไดออกทิลฟทาเลต และเอโซไดคาร์โบนาไมด์ คือ 40 และ 14 phr (Part per hundred parts of resins) ตามลำดับ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ขนาดผงยางรถยนต์ 20 เมช การเติมซิงค์ออกไซด์แทบจะไม่มีผลต่อการสลายตัวของสารให้ฟอง จากสภาวะที่เหมาะสมได้ทำการขึ้นรูปท่อน้ำซีมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) พบว่าท่อน้ำซีมมีค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันน้ำ 5×10^{-3} MPa เท่ากับ 1.13 MPa, 21.85%, 10.41 MPa, 76 (Shore A), 0.78 กรัม/ลบ.ซม. และ 8.95 ลิตร/ซม.-ม. ตามลำดับ

Thesis Title	Study of Porous Water Pipes Produced from Ground Rubber Tyres and Poly(vinyl chloride)
Student	Miss Kanyanee Seangkiatiyuth
Student ID	42061202
Degree	Master of Engineering
Programme	Petrochemical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Anchaleeporn W. Lothongkum
Thesis Co-advisor	Asst. Prof.Dr. Ittipol Jangchud Department of Chemistry, Faculty of Science, KMITL.

ABSTRACT

This work is a preliminary study of porous water pipes produced from ground rubber tyres (GRT) and poly(vinyl chloride) using dioctyl phthalate (DOP) as a plasticiser, azodicarbonamide (AZ) as a blowing agent, and zinc oxide as a kicker. Raw materials were mixed by a high-speed mixer and a two-roll mill. The mixture was then shaped into a porous sheet with thickness of 0.35 cm as a model study by a compression moulding machine. The processing conditions, the amount of DOP and AZ, the weight ratio of GRT/PVC, the effect of zinc oxide on blowing agent, and GRT particle size were investigated. The mechanical, physical, thermal, and morphological properties were characterized. It was found that the suitable compression conditions were at 210 °C for 4 mins. The proposed formula for a porous water pipe contained DOP and AZ 40 and 14 phr (part per hundred parts of resins), respectively, GRT/PVC 60/40 wt% and GRT particle size 20 mesh. It was also found that zinc oxide had almost no effect on the decomposition of the blowing agent. Consequently, the porous water pipe was extruded by a single screw extruder. The tensile strength, % elongation at break, the initial modulus, hardness, bulk density and water permeability at water pressure 5×10^{-3} MPa of the porous water pipe were 1.13 MPa, 21.85%, 10.41 MPa, 76 (shore A), 0.78 g/cm^3 and 8.95 l/h-m, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและดูแลเอาใจใส่การทำงานของผู้นี้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ทำการวิจัย คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือ ทดสอบต่าง ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย คุณบุญญาญ อุอดมัยิง บริษัทแสงไทยผลิตยาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ฝังยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว บริษัทวินิไทย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์พีวีซี บริษัทยูซาไก (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารให้ฟอง บริษัทสยามสเตบิลไอเซอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

กัญญาณี แสงเกียรติยศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำนำ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 การชลประทานแบบหยด.....	8
2.3 พอลิเมอร์ผสมสารเพิ่มเนื้อ (Filled polymers).....	9
2.4 โฟม (Foam).....	11
2.4.1 การผลิตโฟม.....	11
2.4.2 สมบัติต่าง ๆ ของโฟม.....	11
2.5 ยางรถยนต์และการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่.....	14
2.5.1 ยางรถยนต์.....	14
2.5.2 การนำกลับมาใช้ใหม่.....	15
2.6 ท่อน้ำซึมและสมบัติของท่อน้ำซึม.....	18
2.7 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี.....	19
2.8 สารเติมแต่ง.....	20
2.8.1 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน.....	20
2.8.2 สารหล่อลื่น.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.3 พลาสติกไซเซอร์.....	23
2.8.4 สารเพิ่มเนื้อ.....	24
2.8.5 สารให้ฟอง.....	24
2.9 กระบวนการผสม (Compounding).....	26
2.9.1 กระบวนการผสมแบบแบทช์.....	26
2.9.2 กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง.....	27
2.10 กระบวนการขึ้นรูป (Shaping).....	28
2.10.1 การขึ้นรูปโดยการกดอัด.....	29
2.10.2 การผลิตท่อด้วยกระบวนการอัดรีด.....	29
2.11 การแตกหักของพอลิเมอร์.....	31
บทที่ 3 การทดลอง.....	33
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	33
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 การทดลอง.....	34
3.3.1 สูตรที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำซึม.....	34
3.3.2 การเตรียมพีวีซีคอมเปานด์.....	35
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	35
3.3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ.....	37
3.3.5 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม.....	40
3.3.6 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	42
4.1 ผลการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแบบจำลองท่อน้ำซึมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ท่อน้ำซึม.....	42
4.1.1 สภาวะการขึ้นรูป.....	42
4.1.2 ความเข้ากันได้ระหว่างผงยางรถยนต์กับพีวีซี.....	46
4.1.3 ปริมาณไดออกซิลพาทาเลต.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์.....	53
4.1.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี และผลของการเติมซิงค์ออกไซด์	58
4.1.6 ขนาดผงยางรถยนต์.....	68
4.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึมและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 แบบจำลองท่อน้ำซึม.....	76
5.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม.....	77
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	83
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	84
ภาคผนวก ค แบบหัวฉีดท่อในงานวิจัยนี้.....	87
ภาคผนวก ง การหาพื้นที่รูพรุนจาก SEM micrographs โดยโปรแกรม AutoCAD.....	88
ภาคผนวก จ มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำซึม.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับการทดลองของ P. Rajalingam และ W.E. Baker.....	6
2.2 สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ ค่า K และ n ของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริกแข็ง.....	13
2.3 ตัวอย่างสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนประเภทเกลือตะกั่ว	21
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2 สูตรที่ใช้เตรียมชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำซึม	36
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นพีวีซีคอมปานด์	43
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณเอโซไดคาร์ไบโบนาไมด์	58
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วน.....	64
โดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี	
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนัก	67
ของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี	
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบกับขนาดผงยาง.....	69
รถยนต์	
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบกับขนาดผงยางรถยนต์.....	70
4.7 สมบัติท่อน้ำซึมที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพวาดแสดงลักษณะของท่อน้ำซึม.....	2
1.2 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ท่อน้ำซึม.....	2
2.1 รูปร่างของอนุภาคสารเพิ่มเนื้อ.....	10
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความหนาแน่นในพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง.....	12
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำกับความหนาแน่น.....	13
ของโฟม	
2.4 ส่วนประกอบของยางเรเดียน.....	14
2.5 พื้นผิวของผงยางรถยนต์ที่ได้จากการบดแบบต่าง ๆ กำลังขยาย 100 เท่า.....	16
2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้ผงยางรถยนต์เป็นสารเพิ่มเนื้อ.....	18
2.7 ชนิดของสารหล่อลื่น.....	22
2.8 การสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ในพีวีซีเมื่อใช้หิ้งค้อออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ.....	26
2.9 เครื่องผสมความเร็วสูง.....	27
2.10 การแบ่งช่วงเกลียวหนอนตามช่วงการทำงาน.....	28
2.11 การผสมพีวีซีคอมเปานด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน.....	28
2.12 แผนภูมิขั้นตอนการทำงานกดอัด.....	29
2.13 กระบวนการผลิตท่อ.....	30
2.14 หัวฉีดท่อหรือหัวดาย.....	31
3.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่น.....	37
3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์.....	38
3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ.....	40
3.4 หัวฉีดท่อที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อในงานวิจัยนี้.....	41
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของพีวีซีคอมเปานด์กับระยะเวลาการขึ้นรูป.....	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนัก.....	47
ของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี	
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณไดออกซิลพาทาเลต... ..	51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์.....	54
4.5 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ต่าง ๆ.....	57
4.6 การวิเคราะห์การสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ด้วย TGA.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 61 ของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีที่ไม่มีการเติมและเติมซิงค์ออกไซด์	
4.8 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ 66 ต่อพีวีซีต่าง ๆ ไม่เติมซิงค์ออกไซด์	
4.9 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ 67 ต่อพีวีซีต่าง ๆ เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr	
4.10 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่ขนาดผงยางรถยนต์ต่าง ๆ 69	
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับขนาดผงยางรถยนต์ 71	
4.12 ท่อน้ำซึม 74	

คำนำ

องค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งในการพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ คือ พื้นฐานของระบบสาธารณูปโภคที่ดี รวมทั้งการคมนาคมขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์เติบโตอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดขยะจากยางรถยนต์จำนวนมากซึ่งขยะยางรถยนต์เหล่านี้จะต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีไม่เช่นนั้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ในปัจจุบันพบว่ายังมีปัญหาในการกำจัดยางรถยนต์มาก การนำขยะยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ในลักษณะต่าง ๆ เป็นเรื่องที่น่าสนใจเพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะจากยางรถยนต์ที่ต้องกำจัดแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าขยะจากยางรถยนต์ สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม ตัวอย่างการนำขยะยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ที่น่าสนใจ คือ การนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของท่อน้ำซึม (Porous water pipe) เพื่อให้น้ำแก๊พืชในพื้นที่ขาดแคลนน้ำหรือเพื่อให้ปุ๋ยแก๊พืช โดยวางท่อน้ำซึมไว้บนผิวดินหรือฝังไว้ในดินตามแนวรากต้นไม้ จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่ามีการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Ground Rubber Tyres, GRT) กับเรซินใช้ในงานทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่สมบัติเชิงกลยังไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจเนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วแต่ผงยางรถยนต์แสดงความมีขั้วเล็กน้อย จึงมีการยึดเกาะระหว่างกันไม่ค่อยดีนัก ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมโดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วผสมกับเทอร์โมพลาสติกที่มีขั้ว คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) เพราะคาดว่าจะเกิดการยึดเกาะระหว่างกันได้ดีกว่าการใช้พอลิเอทิลีน

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎี

บทที่ 3 การทดลอง

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

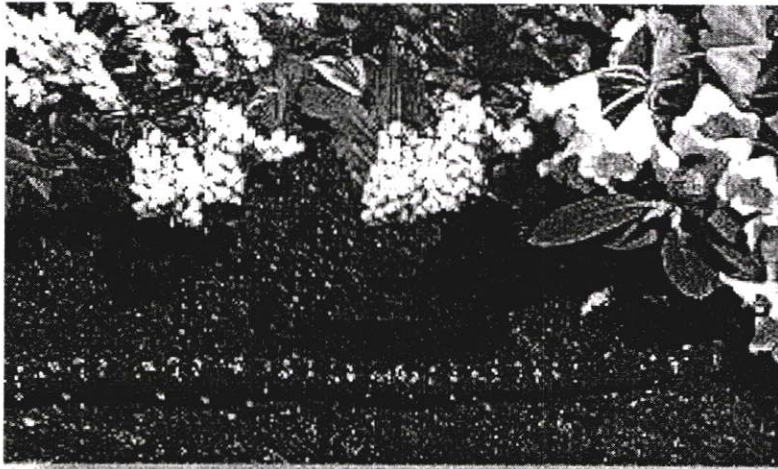
ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีปริมาณการใช้รถยนต์สูง จากข้อมูลของกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ สมาอุตสาหกรรมไทย (ส.อ.ท.) ประเทศไทยมีการผลิตรถยนต์ 109,877 คัน ในระหว่างเดือนมกราคม-มีนาคม 2544 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปี 2543 จำนวน 15,541 คัน เป็นการผลิตเพื่อส่งออก 33,500 คัน ขายในประเทศจำนวน 76,377 คัน [1] จากรายงานการจดทะเบียนรถยนต์ในปี พ.ศ. 2541 มีรถยนต์ที่จดทะเบียนภายใต้พระราชบัญญัติรถยนต์ พ.ศ. 2522 และภายใต้พระราชบัญญัติการขนส่งทางบกประมาณ 750,000 คัน [2] การที่ประเทศไทยมีปริมาณการใช้รถยนต์ภายในประเทศสูงขึ้น ทำให้ปริมาณการใช้ยางรถยนต์และขยะยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพเหล่านี้จะต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีไม่เช่นนั้นจะเกิดปัญหากระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยของมนุษย์ การกำจัดขยะยางรถยนต์ทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการฝังกลบ แต่มีข้อจำกัดที่ต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ อีกทั้งยางรถยนต์เป็นสารที่ย่อยสลายโดยธรรมชาติได้ยากมาก การกำจัดโดยวิธีการเผาจะสิ้นเปลืองพลังงานและก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ การกำจัดโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิง การนำมาหล่อตอกยางใหม่ (Retreadable casing) การนำมาผ่านกระบวนการกำจัดกำมะถันเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรถยนต์ใหม่ หรือผลิตยางสำหรับชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ การนำมาเป็นสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์ (Fillers) ฯลฯ นอกจากจะลดปริมาณขยะยางรถยนต์ลงได้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุที่เป็นของเสียทำให้สามารถใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างคุ้มค่าและเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม [3-6]

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม หากมีการใช้วิทยาการต่าง ๆ ที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้จะทำให้การเพาะปลูกได้ผลอย่างเต็มที่ สามารถทำได้ทั้งในฤดูและนอกฤดูปลูก แม้ว่าจะเป็นที่ที่ขาดแคลนน้ำ วิธีการให้น้ำและปุ๋ยแก่พืชเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเพาะปลูก ปัจจุบันวิธีการให้น้ำแก่พืชทำได้หลายวิธี เช่น การปล่อยให้น้ำไหลท่วมเป็นผืนยาว (Border) การให้น้ำแบบร่อง (Furrow) การฉีดฝอย (Sprinkler) การให้น้ำแบบหยด (Trickle irrigation) ฯลฯ การให้น้ำแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น ขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นที่ ลักษณะการปลูกพืช และแหล่งน้ำ เป็นต้น การให้น้ำแบบหยดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง จึงใช้ได้กับการปลูกพืชเกือบทุกชนิดนับตั้งแต่พืชผัก พืชสวนผลไม้ขนาดใหญ่ และพืชไร่ เช่น อ้อย ข้าวโพด หน่อไม้ฝรั่ง นอกจากนี้ยังใช้ได้ดีกับเนื้อดินแทบทุกประเภท ตั้งแต่เนื้อดินหยาบพวกดินทราย

จนกระทั่งเนื้อละเอียดพวกดินเหนียว และใช้ได้ในพื้นที่ทุกลักษณะ ตั้งแต่ที่ราบจนถึงพื้นที่บนไหล่เขาที่ชัน [7-8] การให้น้ำแบบหยดเป็นการให้น้ำแบบประหยัดเพราะเป็นการให้น้ำครั้งละน้อย ๆ แต่บ่อยครั้ง ด้วยอัตราการให้น้ำที่ต่ำและอาศัยสมบัติของดินช่วยแพร่กระจายน้ำออกไปรอบข้าง ท่อน้ำซึม(รูปที่ 1.1) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ให้น้ำแบบหยดโดยการปล่อยน้ำออกมาตามรูเล็ก ๆ ที่เจาะโดยเครื่องเจาะ ท่อน้ำซึมอาจทำจากวัสดุที่มีรูพรุนสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ นิยมใช้กับพืชที่ปลูกเป็นแถวชิดติดกัน เช่น ผัก มะเขือเทศ และหน่อไม้ฝรั่ง เป็นต้น ท่อน้ำซึมที่วางไว้บนผิวดินควรมีผิวสีดำเพื่อป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำให้การเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำดีและอุดตันรูพรุนของท่อ และแสงเหนือม่วงที่จะทำลายท่อ ตัวอย่างการนำท่อน้ำซึมไปใช้ประโยชน์แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ภาพวาดแสดงลักษณะของท่อน้ำซึม [6]



(ก) ใช้ให้น้ำแก่พืชจำพวกไม้ดอก

รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ท่อน้ำซึม [8]



(ข) ใช้ให้น้ำแก่ต้นกล้า

รูปที่ 1.2 (ต่อ)

มีผู้วิจัยศึกษาการขึ้นรูปท่อน้ำซีเมนต์จากเรซินใช้งานทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว [9-11] พบว่าสามารถผลิตท่อน้ำซีเมนต์ได้ แต่สมบัติเชิงกลยังไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจเนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว แต่ผงยางแสดงความมีขั้วเล็กน้อย จึงมีการยึดเกาะระหว่างกันไม่ดี ดังนั้นถ้าเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีขั้ว เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกับผงยางรถยนต์ในการผลิตท่อน้ำซีเมนต์คาดว่าจะสามารถผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีสมบัติที่ดีได้

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการผลิตท่อน้ำซีเมนต์จากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นสารยึด (Binder) ไดออกทิลฟทาเลต (Diocetyl phthalate, DOP) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticiser) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นสารกระตุ้น (Kicker) สารให้ฟองมีผลต่อรูพรุนของท่อน้ำซีเมนต์ ซึ่งรูพรุนอาจเป็นรูพรุนจากเซลล์ที่ต่อเนื่องกัน (เซลล์เปิด) หรือเซลล์ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (เซลล์ปิด) [12-15] ท่อน้ำซีเมนต์ที่ผลิตได้มีสีดำซึ่งเป็นสีของคาร์บอนดำที่ผสมอยู่ในยางรถยนต์ จึงไม่จำเป็นต้องเติมสีดำให้ลดต้นทุนการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาแนวทางในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับพอลิไวนิลคลอไรด์
- 1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.3.2 ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปท่อน้ำซึม ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป อัตราส่วนที่เหมาะสมของผงยางรถยนต์กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ปริมาณสารเสริมแต่งต่าง ๆ และขนาดของผงยางรถยนต์ เป็นต้น เพื่อกำหนดสภาวะการขึ้นรูป โดยวิธีการกดอัดและการอัดรีดที่เหมาะสม
- 1.3.3 ขึ้นรูปท่อน้ำซึมและศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ได้ท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับพอลิไวนิลคลอไรด์เพื่อใช้ให้น้ำและปุ๋ย แก่พืช
- 1.4.2 สามารถลดปัญหาขยะพอลิเมอร์ประเภทยางรถยนต์โดยนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็น การเพิ่มมูลค่าของเสีย ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า และเป็นการอนุรักษ์ สิ่งแวดล้อม

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้เสนองานวิจัยที่ใช้ผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในการขึ้นรูปท่อน้ำดื่ม เช่น

M.D. Burgoyne และคณะ [16] นำผงยางรถยนต์มาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในยางรถยนต์พบว่าขนาดผงยางรถยนต์เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณผงยางรถยนต์ที่สามารถเติมในยาง การเติมผงยางรถยนต์เป็นสารเพิ่มเนื้อจะทำให้สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Percent elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของชิ้นงานทดสอบลดลง และการเติมผงยางรถยนต์ขนาดเล็กจะทำให้สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบต่ำกว่าการเติมผงยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งปริมาณการเติมผงยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดที่เติมลงในยางรถยนต์โดยทำให้สมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

A. Accetta และ J. M. Vergnaud [17] ศึกษาแนวทางการนำผงยางรถยนต์ผสมเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นป้องกันเสียงจากเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม และป้องกันเสียงต่าง ๆ ในอาคารบ้านเรือน โดยนำยางรถยนต์มาบดที่อุณหภูมิต่ำ ให้มีขนาด 300–900 ไมโครเมตร และใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) ไดออกทิลพาทาเลตเป็นพลาสติกไซเซออร์ ขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยความดัน 10 MPa อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งกด (Hardness) ของชิ้นงานทดสอบที่ผสมกำมะถัน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าชิ้นงานทดสอบที่ผสมกำมะถัน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจะมีค่าน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กำมะถัน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงยางรถยนต์มีการเกาะตัวดีที่สุด และเมื่อทดสอบการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 200–4,000 เฮิรท์ ของชิ้นงานทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร ผสมกำมะถัน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีการดูดกลืนเสียงได้ เช่นเดียวกับแผ่นมาตรฐาน

P. Rajalingam และ W.E. Baker [18] นำผงยางรถยนต์ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าการเติมพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะทำให้สมบัติความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น โดยจะมีผลในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้นมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพบว่าการเคลือบผงยางรถยนต์ด้วยกรดเอทิลีนอะคริลิก (Ethylene acrylic acid) ทำให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับการทดลองของ P. Rajalingam และ W.E. Baker [18]

ชนิดพอลิเมอร์	ดรรชนีการหลอมไหล (กรัม/10 นาที)	รายละเอียด
EAA	20.0	Ethylene-co-acrylic acid (9%)
G1901X	5.4	Styrene-ethylene/butylene-styrene triblock copolymer modified with maleic anhydride (2%)
G1652	1.3	Styrene-ethylene/butylene-styrene triblock copolymer
IB'E'	3.0	Ethylene-co-glycidyl methacrylate (GMA) (12%)
IB'7B'	7.0	Ethylene-co-vinyl acetate (5%)-Co-GMA (12%)
EVA1810	1.3	Ethylene-co-vinyl acetate (18%)
EVA1880M	500.0	Ethylene-co-vinyl acetate (18%)
PE(MAn)	1.5	Maleic anhydride (2%) grafted polyethylene

P. Rajalingam และคณะ [19] ผสมผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น ผงยางรถยนต์ที่ใช้เตรียมโดยวิธีการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Ambient grinding) และแบบเปียก (Wet ambient grinding) และการบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding) ที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส จากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวของผงยางรถยนต์ที่เตรียมได้จาก 3 วิธี พบว่าผงยางรถยนต์ที่เตรียมจากการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้งและแบบเปียกมีพื้นที่ผิวมากและมีลักษณะขรุขระ ส่วนผงยางรถยนต์จากการบดที่อุณหภูมิต่ำจะมีพื้นผิวเรียบ พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของผงยางรถยนต์น้อยกว่าผงยางรถยนต์ที่เตรียมจากการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้งและแบบเปียก จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานทดสอบจากผงยางรถยนต์ที่เตรียมด้วยวิธีบดแบบเปียกจะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าชิ้นงานทดสอบจากผงยางรถยนต์ที่เตรียมด้วยวิธีบดแบบแห้ง และวิธีบดที่อุณหภูมิต่ำตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาเทคนิคการปรับปรุงพื้นผิวของผงยางรถยนต์ ได้แก่ Electron beam radiation treaded GRT, Corona treaded GRT และ Plasma treaded GRT พบว่าวิธี Electron beam radiation treaded GRT เป็นวิธีที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความต้านทานแรงกระแทกดีที่สุด

P.K. Pramanik และ W.E. Baker [20] ศึกษาความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้นผสมกับผงยางรถยนต์ขนาด 40 และ 80 เมช ที่ใช้เอทิลีนอะคริลิกแอซิด และยางธรรมชาติแบบอีพอกซิไดส์ (Epoxidised natural rubber) เป็นสารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทก จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกซิไดส์เพิ่มขึ้น เมื่อผงยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง ความต้านทานแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้น และการเติมไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) หรือการเคลือบผงยางรถยนต์

ด้วยไดควิมิลเปอร์ออกไซด์และไตรแอริลไซยานูเรต (Triallyl cyanurate) จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกระแทก

N. R. Choudhury และ S. N. Bhattacharya [21] ศึกษาความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 70/30 และสมบัติการยึดเกาะกันเมื่อใช้คลอรีนเตตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) 5-30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นสารช่วยผสม จากการศึกษาพบว่าการเติมสารช่วยผสมทำให้ความแข็งแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ดัชนีการหลอมไหลลดลง เนื่องจากสารช่วยผสมจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยผสมจะทำให้ความหนืด และมอดูลัสเพิ่มขึ้นอีกด้วย

A.B. Sawant และ D.D. Kale [22] นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมกับผงยางรถยนต์ และศึกษาสมบัติ ต่าง ๆ ในช่วงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0/100, 10/90,..., 80/20 จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงลดลง เพราะผงยางรถยนต์มีขั้วเล็กน้อย ส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงยึดเกาะกันไม่ได้

E. Kowalska และ Z. Wielgosz [23] ศึกษาการผลิตท่อน้ำดื่มจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีน (ไม่ระบุชนิด) โดยเติมสารให้ฟอง และสารช่วยผสม จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้นความแข็งแรง ณ จุดขาด (Breaking strength) และความหนาแน่นของท่อน้ำดื่มมีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรง ณ จุดขาดจะมีค่าลดลง ส่วนความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อผงยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง ความสม่ำเสมอของรูพรุนและความหนาแน่นของท่อน้ำดื่มจะลดลง จากการทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ พบว่าท่อน้ำดื่มที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 60/40-65/35 มีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำแปรผกผันกับความยาวของท่อ

เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ พรวิ สุมิตร และอมรวดี ยูวโกศล [9] ศึกษาแนวทางการผลิตท่อน้ำดื่มจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำดื่ม คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือ 60/40 และปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ [10] ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำดื่มที่ผลิตจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 60/40 ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง และพอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene graft maleic anhydride,

PE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วง 0-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือพอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นในช่วง 0-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง

สัจจะชัย สัจจะธนสกุล [11] ศึกษาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คือ 60/40 และปริมาณเอซีไดคาร์บอโนไมด์ซึ่งเป็นสารให้ฟองมีค่าเท่ากับ 8 phr

งานวิจัยของ M. Tipanna และ D.D. Kale [24] ศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด และความแข็งกด ของคอมพอสิตพีวีซีกับผงยางไนไตรล์บดละเอียด (Finely ground rollers of nitrile rubber, GNRP) โดยศึกษาในช่วงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางไนไตรล์ต่อพีวีซี 0/100, 10/90, ..., 90/10 พบว่าเมื่อปริมาณผงยางไนไตรล์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และความแข็งกดจะลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืดจะเพิ่มขึ้น สำหรับความต้านทานแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของผงยางไนไตรล์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 0/10, 10/90, ..., 50/50 แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางไนไตรล์ต่อพีวีซีมากกว่า 50/50 คือ 60/40, ..., 90/10 ชิ้นงานทดสอบไม่แตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทกจึงไม่สามารถระบุค่าความต้านทานแรงกระแทกได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมมีค่าตั้งแต่ 60/40, 70/30 และ 80/20 และโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของท่อน้ำซึมเกิดจากช่องว่างระหว่างผงยางรถยนต์กับผงยางรถยนต์ และผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีน ซึ่งการเติมสารให้ฟองจะเป็นการเพิ่มความเป็นรูพรุน และจะทำให้ความแข็งแรงลดลง

2.2 การชลประทานแบบหยด [7, 25]

เริ่มแรกการชลประทานแบบหยดได้พัฒนาในรูปของการให้น้ำใต้ผิวดิน การทดลองครั้งแรกเริ่มที่ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2403 โดยใช้ร่วมกับการให้น้ำจากท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน ในระยะเริ่มแรกนี้ใช้ท่อดินเผาสั้น ๆ ต่อกัน และเปิดรอยต่อไว้สำหรับเป็นทางให้น้ำไหลออกมา เพื่อเป็นการนำน้ำใต้ดินขึ้นมายังบริเวณรากของพืช ปรากฏว่าได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นมาก

ในปี พ.ศ. 2463 การให้น้ำจึงเปลี่ยนรูปมาเป็นแบบท่อเจาะรูให้น้ำไหลออกมาตามแนวท่อ ในปี พ.ศ. 2465 สหรัฐอเมริกาได้ทำการทดลองการให้น้ำแบบหยดโดยฝังท่อจ่ายน้ำใต้ผิวดิน เช่นเดียวกับที่ทำในประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน แต่จะให้น้ำเฉพาะบริเวณเขตราก ซึ่งต้อง

ใช้ค่าจ่ายสูงเนื่องจากวัสดุและอุปกรณ์มีราคาแพงจึงไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงการค้าได้ ต่อมาจึงผลิตท่อรูปท่อนจากวัสดุคล้ายผ้าใบ

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 หลาย ๆ ประเทศ เช่น รัสเซีย ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ และอังกฤษได้พัฒนาระบบท่อรูปท่อนซึ่งทำจากวัสดุต่าง ๆ เช่น พลาสติกและเจาะรูที่ผนังท่อ แต่มีข้อเสีย คือเกิดการอุดตันบริเวณรูที่เจาะ น้ำที่ไหลออกมาตามแนวยาวของท่อไม่สม่ำเสมอ

ประเทศไทยทดลองใช้การให้น้ำแบบหยดกับแปลงพืช เมื่อ พ.ศ. 2518 ที่โครงการหลวงดอยอ่างขาง อำเภอเชียงใหม่ และในปี พ.ศ. 2521 ได้ใช้ระบบการให้น้ำแบบหยดกับสวนผลไม้ที่อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี ปัจจุบันมีผู้สนใจและหันมาใช้ในระบบการให้น้ำแบบหยดมากขึ้นและมีการพัฒนาระบบนี้อย่างต่อเนื่อง เพราะการชลประทานแบบหยดสามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ และสามารถเพิ่มผลผลิตและคุณภาพได้

สภาพที่ควรพิจารณาใช้การชลประทานแบบหยด เช่น

1) พื้นผิวดินไม่สม่ำเสมอระดับแตกต่างกันมาก และหน้าดินบางเกินไปจนไม่สามารถปรับผิวดินให้เหมาะสมได้

2) โครงสร้างของดินโปร่งมากเกินไป โดยมีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากกว่า 8 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีการให้น้ำบนผิวดินได้

3) ความลาดเท (Slope) ของพื้นผิวดินมีมากเกินไป จนอาจเกิดการพังทลายของผิวดินขณะส่งน้ำเข้าสู่พื้นที่เพาะปลูกโดยวิธีการให้น้ำบนผิวดินได้

4) พื้นที่ที่มีลมพัดผ่านแรง ๆ เป็นประจำ และความเร็วลมเกินกว่า 8 กิโลเมตร/ชั่วโมง

ระยะเวลาการให้น้ำแบบหยดขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลจากแหล่งน้ำเข้าสู่พื้นที่เพาะปลูก ถ้าพื้นที่เพาะปลูกมีปริมาณน้ำที่ไหลเข้ามาน้อยต้องใช้เวลาการให้น้ำนาน แต่ตามปกติจะไม่นิยมให้น้ำนานติดต่อกัน 24 ชั่วโมงทุกวัน เพราะต้องเผื่อเวลาในการพักเครื่องสูบน้ำหรือบำรุงรักษาเครื่อง การทำความสะอาดเครื่องกรองน้ำ ฯลฯ เวลาให้น้ำที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 18 ชั่วโมง/วัน

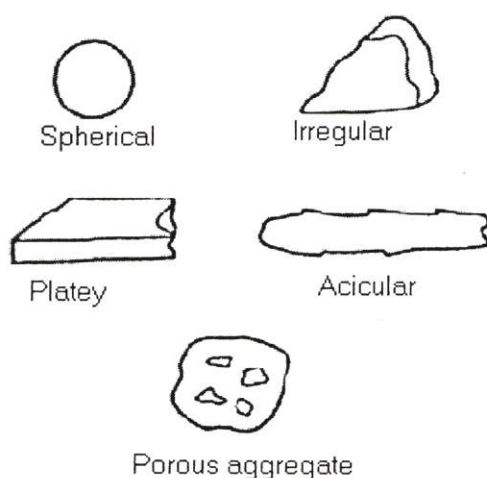
2.3 พอลิเมอร์ผสมสารเพิ่มเนื้อ (Filled polymers) [6, 26]

พอลิเมอร์ที่มนุษย์รู้จักและใช้ประโยชน์ชนิดแรก คือ พอลิเมอร์ที่สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural polymers) เช่น ฝ้าย แป้ง ขนสัตว์ ยางธรรมชาติ ฯลฯ ต่อมาต้นศตวรรษที่ 20 จึงมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ ฯลฯ และนำมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนวัตถุดิบที่มีอยู่เดิมตัวอย่างเช่น กระดาษ แก้ว โลหะ ไม้ และยางธรรมชาติ เป็นต้น จากการที่ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและมีการผลิตในเชิงการค้า จึงมีความพยายามที่จะลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ โดยการเติมสารเพิ่มเนื้อลงไปในพอลิเมอร์

ตัวอย่างเช่น การเติมแป้งในพอลิเอทิลีน การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพีวีซี และการเติมผงยางรถยนต์ลงในพีวีซี เป็นต้น โดยทั่วไปการเติมสารเพิ่มเนื้อลงในพอลิเมอร์จะทำให้ความแข็ง (Rigidity) ความทนต่อการเสียรูปเนื่องจากความร้อน และความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น สารเพิ่มเนื้อแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) สารเพิ่มเนื้อที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic fillers) ตัวอย่างเช่น เส้นใยจากไม้ (Wood fibers) ผงยางรถยนต์ เป็นต้น
- 2) สารเพิ่มเนื้อที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic fillers) ตัวอย่างเช่น ใยแก้ว (Glass fibers) ดิน เป็นต้น

รูปร่างของอนุภาคสารเพิ่มเนื้อแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปร่างของอนุภาคสารเพิ่มเนื้อ [26]

สารเพิ่มเนื้ออาจมีรูปร่างลักษณะเป็น ทรงกลม รูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) เป็นแผ่น (Platey) ฯลฯ การใช้สารเพิ่มเนื้อที่มีขนาดใกล้เคียงกันผสมกับพอลิเมอร์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากสารเพิ่มเนื้อกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคัดขนาดสารเพิ่มเนื้อก่อนนำไปใช้งาน โดยทั่วไปสารเพิ่มเนื้อที่มีขนาดมากกว่า 40 ไมโครเมตร สามารถคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนได้ ซึ่งการคัดขนาดจะทำเมื่ออนุภาคสารเพิ่มเนื้อเป็นผงแห้ง สำหรับสารเพิ่มเนื้อที่จับตัวกันเป็นก้อนจะคัดขนาดโดยทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยในของเหลว ตัวอย่างของเหลวที่ใช้ ได้แก่ น้ำ บิวทานอล ฯลฯ ส่วนสารเพิ่มเนื้อที่มีขนาดน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร จะคัดขนาดโดยเทคนิคอื่นแทนการใช้ตะแกรงร่อน ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ คือ การตกตะกอนสารเพิ่มเนื้อในของเหลวโดยเฉพาะในน้ำ

จากการที่สารเพิ่มเนื้อและพอลิเมอร์มีพื้นผิว 2 ส่วน คือ ส่วนที่แสดงความมีขั้ว และส่วนที่แสดงความไม่มีขั้ว ดังนั้นความเป็นเนื้อเดียวกันของสารเพิ่มเนื้อและพอลิเมอร์ จะขึ้นกับความ

เหมือนกันของชนิดของพื้นผิวของส่วนผสมทั้งสอง ถ้าพื้นผิวของสารเพิ่มเนื้อและพอลิเมอร์มีขี้หรือไม่มีขี้เหมือนกัน สารเพิ่มเนื้อและพอลิเมอร์จะเข้ากันได้ดี แต่เนื่องจากสารเพิ่มเนื้อและพอลิเมอร์หลายชนิดมีชนิดของพื้นผิวต่างกัน ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวของสารเพิ่มเนื้อสามารถทำได้โดยการทำให้สารเพิ่มเนื้อสามารถสร้างพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรือพันธะไอออนิกกับพอลิเมอร์ได้ด้วยการเติมสารช่วยผสม

2.4 โฟม (Foam) [27-28]

จากการที่แผ่นน้ำซึมหรือท่อน้ำซึมมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนซึ่งเกิดจากการแทนที่ของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟองกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานทดสอบ คล้ายกับสมบัติและหลักการผลิตโฟม จึงขออธิบายเกี่ยวกับโฟมต่อไปนี้

โฟม คือ วัตถุที่มีน้ำหนักเบาภายในเนื้อมียูฟองอากาศ ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ โฟมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามโครงสร้างของเซลล์ คือ

- โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ไม่ต่อเนื่องกัน
- โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้

สำหรับโฟมที่มีทั้งเซลล์ปิดและเซลล์เปิดอยู่ด้วยกันเรียกว่า "แบบเซลล์ผสม" โฟมพลาสติกประกอบด้วยโครงสร้างของเซลล์ที่ได้จากการแทรกตัวของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของสารให้ฟองซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.4.1 การผลิตโฟม

การผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- 1) วิธีทางกายภาพ คือ ใช้ก๊าซอัดหรือผสมสารเคมีทำให้เกิดก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์เมื่อนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพอลิเมอร์พองขึ้นเป็นโฟม ตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene)
- 2) วิธีทางเคมี คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีสองชนิดทำให้เกิดโฟม วัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยของเหลวสองชนิดหรือมากกว่า โดยชนิดหนึ่งเป็นพอลิเมอร์เหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นส่วนผสมของวัสดุตกผลึกหรือตัวทำให้แข็งและสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เหลวเพื่อให้เกิดก๊าซ ตัวอย่างเช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam)

2.4.2 สมบัติต่าง ๆ ของโฟม

ความหนาแน่นของโฟมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณก๊าซที่เกิดจากสารให้ฟองที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ที่จะทำเป็นโฟม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกล เช่น ความ

แข็งแรงกดอัด ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงดึง ฯลฯ (ในตารางที่ 2.2) กับความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งแสดงดังสมการที่ 2.1 และสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.2

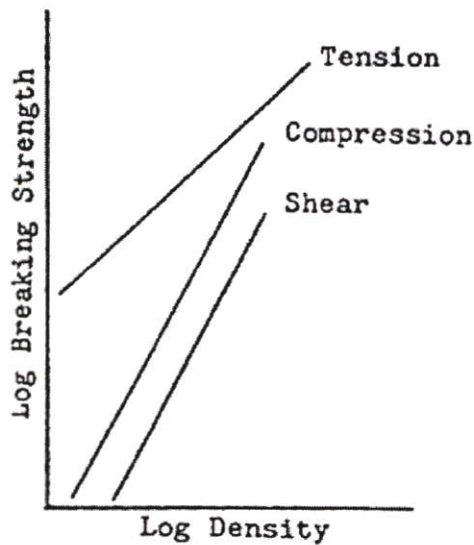
$$P = KD^n \quad (2.1)$$

เมื่อ P = สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ

D = ความหนาแน่น

K, n = ค่าคงที่ของพอลิเมอร์และสมบัติความแข็งแรงนั้น ๆ

ค่า P, K และ n แสดงในตารางที่ 2.2



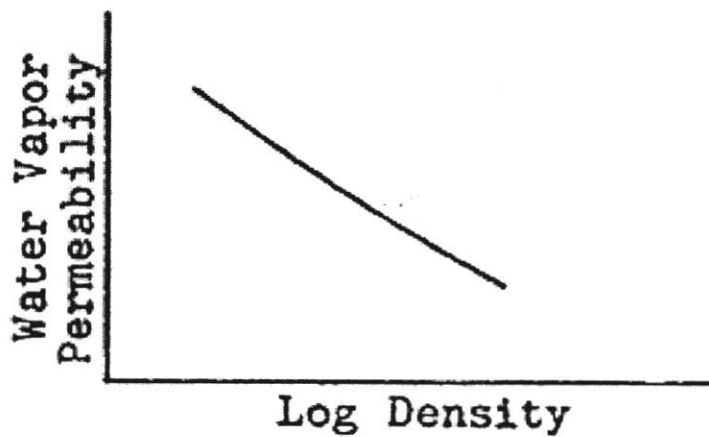
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความหนาแน่นในพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง [27]

เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ เพิ่มขึ้น
- 2) การดูดกลืนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น
- 3) การยืดออก ณ จุดสูงสุด (Ultimate elongation) เพิ่มขึ้น
- 4) การถ่ายเทความร้อนลดลง ทำให้มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนดีขึ้น
- 5) สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำลดลง (ดังรูปที่ 2.3)
- 6) ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง

ตารางที่ 2.2 สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ ค่า K และ n ของพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง [27]

สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ (P)	K	n
ความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength)	12.8	1.54
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	19.0	1.36
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	23.0	1.20
ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength)	14.9	1.16
มอดุลัสกดอัด (Compressive modulus)	293.8	1.62
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	186.3	1.75
มอดุลัสดึง (Tensile modulus)	573.5	1.15
มอดุลัสเฉือน (Shear modulus)	169.9	1.39



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำกับความหนาแน่นของโฟม [27]

ขนาดของเซลล์ เมื่อขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นจะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) สมบัติความแข็งแรงต่าง ๆ จะลดลง
- 2) การดูดกลืนการกระแทกจะลดลง
- 3) เกิดการโค้งงอ (Buckling failure) ในระหว่างการอัด
- 4) มีสมบัติการเป็นฉนวนลดลง
- 5) มีสมบัติการซึมผ่านของน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น

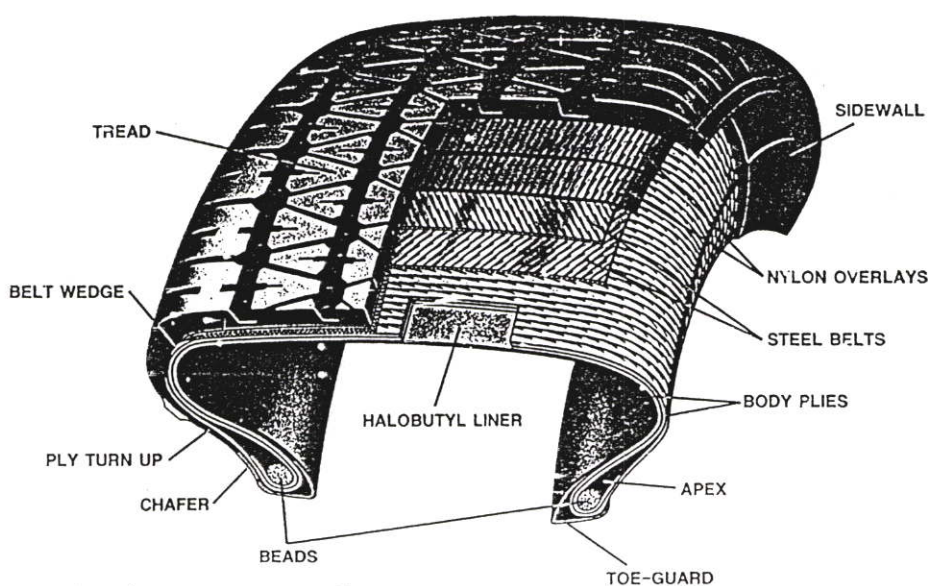
เมื่อขนาดเซลล์เล็กลงจะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ความแข็งแรงและการยืดออก ณ จุดสูงสุดจะเพิ่มขึ้น
- 2) มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้น

2.5 ยางรถยนต์และการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ [5-6, 29-33]

2.5.1 ยางรถยนต์

ในประวัติศาสตร์การค้นพบสิ่งประดิษฐ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การประดิษฐ์ล้อรถจากไม้ ซึ่งถูกใช้ประโยชน์ด้านการคมนาคมขนส่ง และมีการพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่ง พ.ศ. 2382 Charles Goodyear ได้ค้นพบวิธีการวัลคาไนเซชัน (Vulcanisation) ทำให้สามารถผลิตล้อจากยาง มีความสามารถรับแรง และมีความทนทาน ซึ่งนิยมใช้กันแพร่หลายจนกระทั่งปัจจุบัน ส่วนประกอบของยางรถขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่นำยางไปใช้ ตัวอย่างเช่น ยางสำหรับรถบรรทุก ยางสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลหรือยางเรเดียน เป็นต้น ตัวอย่างส่วนประกอบของยางเรเดียน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของยางเรเดียน [29]

- หน้ายาง (Tread) เป็นส่วนที่สัมผัสกับผิวถนน จึงต้องการยางที่มีสมบัติทนทานต่อการขัดสี (Wear resistance) มีความร้อนสะสม (Heat buildup) ต่ำ ส่วนนี้มักประกอบด้วยยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber, BR) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ซึ่งถูกผสมกับคาร์บอนดำ น้ำมัน และสารเชื่อมโยง

- ยางใน (Liner) ทำหน้าที่รับน้ำหนัก เลือกใช้ยางไอโซบิวทิลีน-ไอโซพรีน (Isobutylene-Isoprene Rubber, IIR) หรืออนุพันธ์ของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการซึมผ่านของก๊าซต่ำ

- แก้มยาง (Sidewall) ต้องการสมบัติการรับแรงกระแทกที่ดี ซึ่งช่วยควบคุมการวิ่งของรถ ส่วนแก้มยางนี้ประกอบด้วยยางไนไตรล์ (Nitrile Rubbers, NBR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางบิวทาไดอีน ผสมกับคาร์บอนดำ น้ำมันต่าง ๆ และสารประกอบอินทรีย์

2.5.2 การนำกลับมาใช้ใหม่

การนำกลับมาใช้ใหม่หรือกระบวนการรีไซเคิล คือ การนำขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น แก้ว อะลูมิเนียม กระดาษ พลาสติก ยางรถยนต์ ฯลฯ กลับมาใช้ใหม่ในรูปของผลิตภัณฑ์เดิมหรือไม่ก็ได้ การนำกลับมาใช้ใหม่มีกระบวนการ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเก็บรวบรวม การแยกประเภทวัสดุแต่ละชนิดออกจากกัน การผลิตหรือปรับปรุง และการนำมาใช้ประโยชน์

การนำกลับมาใช้ใหม่แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

ก) การนำกลับมาใช้ใหม่แบบปฐมภูมิ (Primary recycling) เป็นการนำกลับมาใช้ใหม่โดยการนำขยะต่าง ๆ เช่น แก้ว พลาสติก แก้ว อะลูมิเนียม ฯลฯ มาหลอม แล้วนำไปขึ้นรูปใหม่ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติและสมรรถนะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ใหม่

ข) การนำกลับมาใช้ใหม่แบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) เป็นนำกลับมาใช้ใหม่โดยอาศัยหลักการผสมผสานวัตถุดิบ ตัวอย่างเช่น การผสมขยะพลาสติกกับสารเติมแต่ง เช่น ไม้ กระดาษ เป็นต้น หรือการผสมกับพลาสติกใหม่ชนิดเดียวกันก็ได้ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น พับรองเท้า เบาะจักรยาน เครื่องใช้ภายในบ้าน ของเล่นสำหรับเด็ก ฯลฯ

ค) การนำกลับมาใช้ใหม่แบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) เป็นการนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ได้มอนอเมอร์ สารเคมี และเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ โดยกระบวนการที่เหมาะสม เช่น ไกลโคไลซิส (Glycolysis) เมทาโนไลซิส (Methanolysis) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)

การนำยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่เริ่มมีมาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 20 ซึ่งในช่วงแรกจะนำผงยางรถยนต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านหินและน้ำมันในโรงงานต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ฯลฯ ต่อมามีการพัฒนาการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่โดยวิธีต่าง ๆ เช่น การนำมาหล่อดอกยางใหม่ การนำมาผสมในวัตถุดิบผลิตยางรถยนต์และชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ การนำมาเป็นสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์สำหรับแผ่นบุพื้น และท่อน้ำซึม เป็นต้น การนำยางรถยนต์เข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จำเป็นต้องลดขนาดยางรถยนต์ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยการบดก่อน เนื่องจากยางรถยนต์มีขนาดใหญ่ และมีความยืดหยุ่น ซึ่งการบดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมี 2 วิธี คือ

ก) การบดที่อุณหภูมิห้อง [6]

กระบวนการเปลี่ยนชิ้นยางรถยนต์เป็นผงยางรถยนต์ โดยการบดยางรถยนต์ให้เป็นผงที่อุณหภูมิห้อง จะเป็นการบดแบบแห้ง หรือบดแบบเปียก กระบวนการบดแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- การตัด (Shredding) ยางรถยนต์จะถูกแยกตามองค์ประกอบของยางรถยนต์ จากนั้นถูกตัดให้มีขนาด 50 มิลลิเมตร × 50 มิลลิเมตร ซึ่งเรียกกางรถยนต์ที่มีขนาดเล็กกว่า

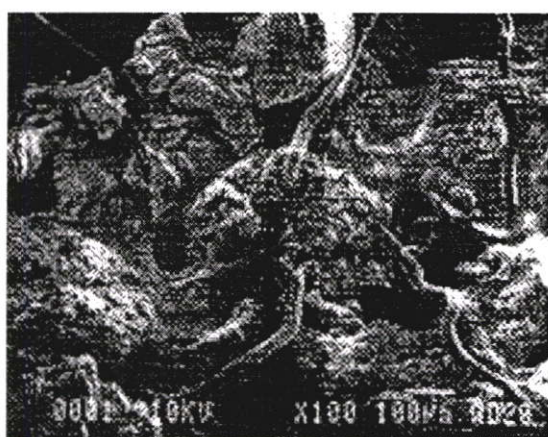
เศษยางรถยนต์ (Scrap rubber tyres) และเศษยางรถยนต์เหล่านี้จะถูกบดให้มีขนาดน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร ส่วนโลหะที่ผสมอยู่ในเศษยางรถยนต์ถูกแยกออกโดยสายพานแม่เหล็กขณะลำเลียงเศษยางรถยนต์เข้าสู่ขั้นตอนทำเม็ด

- การแยก (Separation) ยางรถยนต์ที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จะมีเส้นใยปริมาณมากซึ่งต้องแยกออก ถ้าไม่แยกเส้นใยเหล่านี้ออกจะมีการปนเปื้อนอยู่ในเศษยางรถยนต์หรือผงยางรถยนต์ทำให้เศษยางรถยนต์หรือผงยางรถยนต์เกิดพันธะที่ไม่ต้องการกับสารตัวอื่นในระหว่างการนำไปใช้งาน

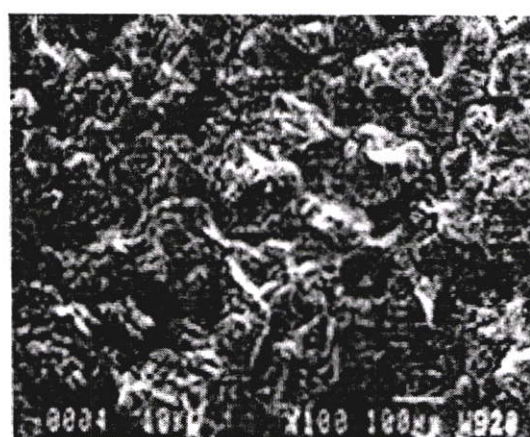
- การทำเม็ด (Granulation) ตัดเศษยางรถยนต์ให้มีขนาด 6 มิลลิเมตร ด้วยใบมีดหมุนที่ออกแบบเป็นพิเศษ ส่วนโลหะและเส้นใยที่เหลืออยู่จะถูกแยกออกอีกครั้งโดยสายพานแม่เหล็ก และ Cyclonic fluff separator ตามลำดับ จากนั้นเศษยางรถยนต์จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดเพื่อทำให้มีขนาดประมาณ 1.7 มิลลิเมตร

ข) การบดที่อุณหภูมิต่ำ

เป็นกระบวนการบดยางรถยนต์ โดยการนำเศษยางรถยนต์แช่ในไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ -195 องศาเซลเซียส แล้วจึงบดด้วย Hammer mill และทำการแยกโลหะและเส้นใยออกไปพร้อม ๆ กัน ผงยางรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการบดวิธีนี้จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าผงยางรถยนต์ที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิห้อง แต่มีขนาดสม่ำเสมอมากกว่า (ดังรูปที่ 2.5) อีกทั้งการบดโดยวิธีนี้ยังใช้พลังงานในการบดน้อยกว่าวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง

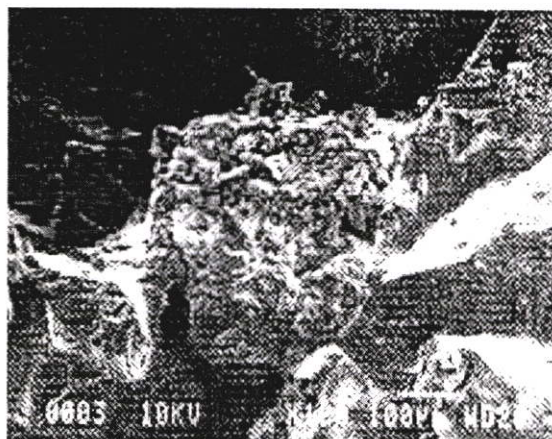


(ก) การบดแบบแห้งที่อุณหภูมิห้อง



(ข) การบดแบบเปียกที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 2.5 พื้นที่ผิวของผงยางรถยนต์ที่ได้จากการบดแบบต่าง ๆ กำลังขยาย 100 เท่า [6]



(ค) การอบดที่อุณหภูมิต่ำ

รูปที่ 2.5 (ต่อ)

ผงยางรถยนต์ถูกใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อสำหรับ

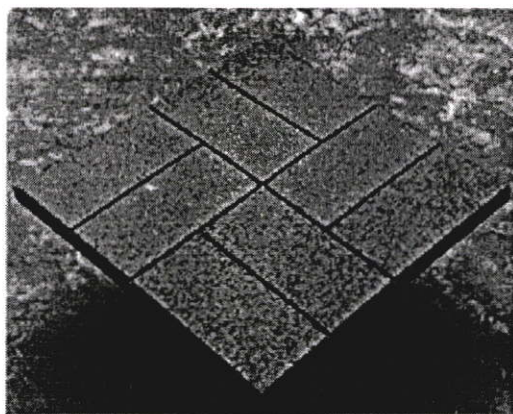
- ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ ผงยางรถยนต์จะถูกผสมกับวัตถุดิบผลิตภัณฑ์ ปริมาณผงยางรถยนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับ การนำยางรถยนต์ไปใช้งาน การเติมผงยางรถยนต์จะทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนความร้อนสะสม และ Oxidative aging จะเพิ่มขึ้น

- ผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้น ผสมผงยางรถยนต์กับพอลิยูรีเทน ผงยางรถยนต์ที่ใช้ควรมีขนาดเล็กกว่า 4 เมช แต่ไม่ควรเติมผงยางรถยนต์ที่ละเอียดมากลงไป เพราะผงยางรถยนต์ละเอียดมีพื้นที่ผิวมากทำให้ต้องใช้พอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้น แผ่นปูพื้นที่ผลิตได้มีสมบัติดูดกลืนเสียง และทนแรงกระแทกได้ดี ตัวอย่างการนำแผ่นปูพื้นไปใช้ ได้แก่ สนามกีฬา สนามกอล์ฟ และทางเดิน เป็นต้น (รูปที่ 2.6)

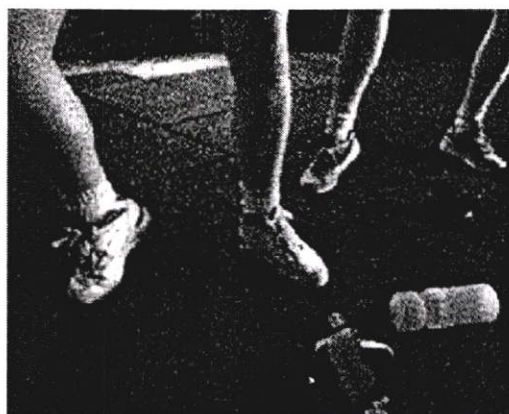
- ผสมกับยางมะตอยเพื่อลาดถนน การเติมผงยางรถยนต์ลงในยางมะตอยจะช่วยลดการแตกของผิวถนน เพิ่มความทนทาน และลดการซึมผ่านของน้ำ

- ผสมกับคอนกรีต การเติมผงยางรถยนต์ลงในคอนกรีตเพื่อใช้ในงานก่อสร้างเรียกว่า "Rubcrete" โดยเติมผงยางรถยนต์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้สิ่งก่อสร้าง เช่น ทางเดิน แผ่นป้องกันเสียง สะพาน ฯลฯ มีความแข็งแรงขึ้น

- ท่อน้ำซึม ผลิตโดยนำผงยางรถยนต์ผสมกับพอลิเมอร์ประเภทเรซินใช้งานทั่วไป (ดังรูป 2.6) ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมช การไหลของน้ำผ่านช่องว่างในผนังท่อที่เกิดจากผงยางรถยนต์กับผงยางรถยนต์ และผงยางรถยนต์กับพอลิเมอร์ ตัวอย่างการนำท่อน้ำซึมไปใช้งาน ได้แก่ ใช้ให้น้ำและปุ๋ยแก่พืช ใช้ให้อากาศแก่ปลาและกุ้ง เป็นต้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้ผยงยารถยนต์เป็นสารเพิ่มเนื้อ [6, 8]

- (ก) แผ่นปูพื้นผลิตจากพอลิโพรพิลีนผสมกับผยงยารถยนต์ปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
- (ข) แผ่นปูพื้นในห้องออกกำลังกาย
- (ค) แผ่นปูพื้นทางเดิน
- (ง) ท่อน้ำซึม

2.6 ท่อน้ำซึมและสมบัติของท่อน้ำซึม

ท่อน้ำซึม คือ ท่อที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนแบบเซลล์เปิดและเซลล์ปิดที่บริเวณผนังท่อ โดยโครงสร้างรูพรุนแบบเซลล์เปิดจะทำให้น้ำสามารถซึมผ่านผนังท่อได้ ท่อน้ำซึมที่ขึ้นรูปได้จะถูกทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐานที่ใช้ทดสอบท่อทั่วไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ใช้ขึ้นรูปท่อน้ำซึมและการนำท่อน้ำซึมไปใช้งาน วัตถุประสงค์ที่ใช้ขึ้นรูปท่อน้ำซึมในงานวิจัยนี้มีพีวีซีเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงใช้มาตรฐาน ASTM D3915-89 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติของท่อพีวีซี เช่น ความต้านทานแรงกระแทก (ASTM D256) สมบัติการดึงยืด (ASTM D638) สมบัติความโค้งงอเมื่อได้รับความร้อน (Deflection temperature of plastics under flexural load, ASTM D648)

ฯลฯ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาท่อเพื่อใช้ให้น้ำและปุ๋ยแก่พืช ดังนั้นจึงทดสอบสมบัติการดึงยึด คือ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส สมบัติความแข็ง คือ ค่าความแข็งกด (ASTM D2240) ความหนาแน่น สมบัติการซึมผ่านของน้ำ (ISO 9261:1991) และ สันฐานวิทยา

ตัวอย่างของท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้าและงานวิจัย ได้แก่

บริษัท Micro-flo Industries จำกัด [34] ผลิตท่อน้ำซึมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ คือ 80/20 ท่อน้ำซึมที่ผลิตได้มีสีดำ ผิวขรุขระ กลิ่นคล้ายยางรถยนต์ที่ผลิตใหม่ มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 4.14 MPa (ASTM D412)

สำหรับอัตราการซึมผ่านของน้ำจะขึ้นอยู่กับงาน เช่น ท่อน้ำซึมเพื่อให้น้ำและปุ๋ยแก่พืชใช้ค่าตามมาตรฐานการให้น้ำแบบหยด คือ 1-20 ลิตร/ชั่วโมง สำหรับท่อน้ำซึมที่ฝังไว้ใต้พื้นบ้านเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำใต้ดินป้องกันบ้านทรุด และท่อน้ำซึมเพื่อให้อากาศแก่สัตว์น้ำ จะต้องม้ออัตราการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าท่อน้ำซึมเพื่อให้น้ำและปุ๋ยแก่พืช

บริษัท Leaky Pipe จำกัด ผลิตท่อน้ำซึม [8] (ไม่ระบุวัตถุดิบและสมบัติต่าง ๆ) เพื่อใช้ให้น้ำแก่พืชในพื้นที่กว้าง เช่น สนามกอล์ฟ สนามฟุตบอล สวนหย่อมภายในบ้าน และให้อากาศแก่สัตว์น้ำ

เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ พรรณี สุมิตร และอมรรวี ยุวโกศล [9] ศึกษาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนต่าง ๆ

ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ [10] ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมที่ผลิตจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 60/40 ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมต์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง และพอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม

สัจจะชัย สัจจะธนสกุล [11] ศึกษาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเท่ากับ 60/40 และปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมต์ซึ่งเป็นสารให้ฟองมีค่าเท่ากับ 8 phr

2.7 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี [14-15]

พอลิไวนิลคลอไรด์เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการตั้งแต่ พ.ศ. 2415 แต่ยังไม่สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ก่อนอุณหภูมิหลอมตัวจนกระทั่ง พ.ศ. 2471 พบว่าโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากไวนิลคลอไรด์ผสมไวนิลอะซิเตตลงไปแล้วเล็กน้อย สามารถนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการสลายตัวมากนัก

การเตรียมไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ นำเอทิลีนมาทำปฏิกิริยากับคลอรีนในวัฏภาคของเหลว ที่อุณหภูมิประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส โดยใช้เหล็กคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เอทิลีนไดคลอไรด์ จากนั้นทำปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน เพื่อกำจัดกรดเกลือออกโดยเผาที่ 300-600 องศาเซลเซียส ได้ไวนิลคลอไรด์

พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติกมีลักษณะสายโซ่ตรง อะตอมคลอรีนในสายโซ่จะทำให้พีวีซีมีสมบัติต่างไปจากพอลิเอทิลีนเนื่องจากมีแรงดึงระหว่างโมเลกุลมากขึ้น ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ 87 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 212 องศาเซลเซียส การเติมพลาสติกไซเซออร์จะทำให้อุณหภูมิตั้งแต่คล้ายแก้วลดลง ลักษณะการเรียงตัวของคลอรีนมักเป็นแบบอะแทกติก ทำให้มีลักษณะความเป็นผลึกต่ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ไม่ติดไฟ ทนต่อสารเคมี ไม่ละลายในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้ว น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight-average molecular weight, M_w) = 100,000-200,000 และ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Number-average molecular weight, M_n) = 45,000-64,000 พีวีซีที่ได้ปกติไม่มีสี และถ้าใช้อุณหภูมิประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส ในกระบวนการขึ้นรูปอาจทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้และสูญเสียกรดเกลือออกไปจากโมเลกุลเกิดเป็นพอลิอิน จึงต้องเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilisers) เพื่อป้องกันการสลายตัวของพีวีซี นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่ง (Additives) อื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพีวีซี เช่น พลาสติกไซเซออร์ สารเพิ่มเนื้อ (Fillers) สารหล่อลื่น (Lubricants) สารให้ฟอง สี (Pigments) ฯลฯ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพีวีซี เช่น ท่อน้ำ ผนังเทียม ฉนวนหุ้มสายไฟ ขวด รองเท้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ ฯลฯ

2.8 สารเติมแต่ง [13-15, 35-38]

พีวีซีเป็นพลาสติกที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการผสมสารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อให้พีวีซีคงสภาพเมื่ออยู่ในสภาพร้อนนาน ๆ นอกจากนี้เพื่อปรับปรุงให้ได้สมบัติต่าง ๆ ตามต้องการ สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้กับพีวีซีประกอบด้วย

2.8.1 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เป็นสารที่เติมเพื่อทำให้พีวีซีเสถียรต่อความร้อน ในกระบวนการขึ้นรูป แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

ก) สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ของเกลือตะกั่ว (Inorganic and organic lead salts)

ข) อนุพันธ์ของโลหะทรานซิชันหมู่ที่ 2 เช่น แบเรียม แคดเมียม สังกะสี ฯลฯ

ค) สารอินทรีย์ที่เป็นอนุพันธ์ของเตตระวาเลนต์ทิน (Organic derivatives of tetravalent tin)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สารประกอบอินทรีย์ของเกลือตะกั่วประเภทตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide, PbO) และอนุพันธ์ของโลหะทรานซิชันหมู่ที่ 2 คือ แคลเซียม/ซิงค์ (Calcium/Zinc stabilisers)

เกลือตะกั่ว (Lead salt) ทำหน้าที่เป็นทั้งสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและสารหล่อลื่น มีราคาถูก มักใช้ในรูปแบบของเกลือตะกั่วผสมกับสารหล่อลื่นและสารเติมแต่งอื่น ๆ เพื่อลดการฟุ้งกระจายของเกลือตะกั่ว นิยมใช้ผสมกับพีวีซีเพื่อใช้ในการผลิตท่อ ข้อต่อ ฉนวนเคเบิลอ่อน ฯลฯ ข้อเสียของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนประเภทนี้ คือ มีน้ำหนักมากซึ่งอยู่ในรูปฝุ่นผงอีกทั้งเป็นพิษและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ทึบแสง สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนประเภทเกลือตะกั่วมีหลายชนิด ตัวอย่างของเกลือตะกั่วที่ใช้ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนประเภทเกลือตะกั่ว [14]

ชื่อสาร	สูตรเคมี	ความถ่วงจำเพาะ
Lead oxide	PbO	9.5
Basic lead carbonate	$PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$	6.6
Dibasic lead carbonate	$(C_7H_{16}COO)_2Pb$	1.1
Tribasic lead sulfate :	$3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$	6.4
Basic lead silicate sulfate	Complex	5.5
Dibasic lead phthalate	$2PbO \cdot C_6H_4(OOC)_2Pb$	4.6
Dibasic lead phosphite	$2PbO \cdot PbHPO_3 \cdot 1/2H_2O$	6.1
Dibasic lead stearate	$2PbO \cdot (C_{17}H_{35}COO)_2Pb$	2.0
Normal lead stearate :	$(C_{17}H_{35}COO)_2Pb$	1.4

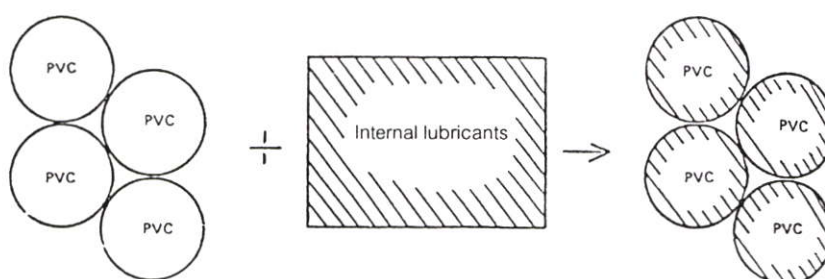
แคลเซียม/ซิงค์ เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนประกอบด้วยแคลเซียมสเตียเรตและซิงค์สเตียเรต สมบัติต่าง ๆ ของพีวีซี ได้แก่ ความสามารถในการทนความร้อน ความใส และความขุ่นของผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแคลเซียม/ซิงค์ ถ้าปริมาณแคลเซียมมาก พีวีซีจะสามารถทนความร้อนได้นาน ผลิตภัณฑ์มีสีขาวขุ่น แต่ถ้าปริมาณของซิงค์มาก ความสามารถในการทนความร้อนจะลดลง ผลิตภัณฑ์ใสไม่มีสี สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิดนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นอีกด้วย เพราะมีซิงค์สเตียเรตเป็นองค์ประกอบ จากการที่แคลเซียม/ซิงค์ เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้ผสมกับพีวีซีเพื่อผลิตภัณฑ์ประเภท ของเล่นเด็ก ขวดพีวีซีแข็ง ท่ออ่อนทางการแพทย์ ฯลฯ

2.8.2 สารหล่อลื่น เป็นสารที่เติมเพื่อป้องกันไม่ให้พีวีซีติดผนังเครื่องจักรขณะผ่านกระบวนการผลิตและการขึ้นรูป สารหล่อลื่นจะแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของพีวีซีเพื่อช่วยหล่อลื่น

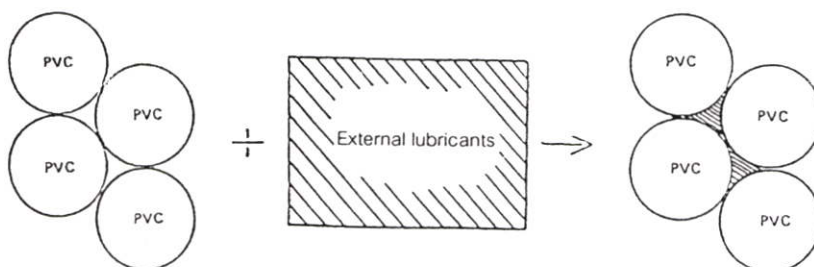
ขณะพีวีซีหลอมตัว สารหล่อลื่น และพลาสติกไซเซอร์มีความสำคัญในการควบคุมการหลอมตัว และการไหลของพีวีซีในเครื่องจักร สารหล่อลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการทำงานใน พีวีซีหลอมเหลว (ดังรูปที่ 2.7) ได้แก่

ก) สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) ช่วยลดความหนืดของพีวีซีหลอมเหลว ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

ข) สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) จะเคลือบตัวออกจากพีวีซีหลอมเหลว และช่วยลดแรงดึงดูดของพีวีซีหลอมเหลวกับผิวของเครื่องจักร ซึ่งช่วยปรับปรุงความสามารถในการผลิตให้ดีขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 ชนิดของสารหล่อลื่น [14]

(ก) สารหล่อลื่นภายใน

(ข) สารหล่อลื่นภายนอก

การขึ้นรูปพีวีซีควรใช้สารหล่อลื่นทั้งภายในและภายนอกในปริมาณเหมาะสม เพื่อให้ได้พีวีซีคอมปานด์ที่ดี ถ้าเติมสารหล่อลื่นน้อยเกินไปจะทำให้มีความหนืดสูงและพีวีซีอาจเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน แต่ถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้พีวีซีหลอมเหลวยากหรือไม่หลอมเหลว สารหล่อลื่นที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์สเตียเรต กรดไขมัน และซิลิเกตอนินทรีย์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้สารหล่อลื่นที่ใช้ คือ กรดสเตียริก (Stearic acid)

2.8.3 พลาสติไซเซอร์ (Plasticisers) พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลได้ของพอลิเมอร์นั้น โดยทำให้อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนสมบัติจากแข็งเปราะแตกง่ายเหมือนแก้วไปเป็นวัตถุที่มีสมบัติอ่อน ยืดหยุ่นได้และเหนียว กระบวนการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์เรียกว่า พลาสติไซเซชัน (Plasticisation) พลาสติไซเซอร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก) พลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticisers) พลาสติไซเซอร์ประเภทนี้รวมเป็นส่วนหนึ่งของสายโซ่พอลิเมอร์ด้วย พันธะระหว่างโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เป็นแบบโคเวเลนต์ ดังนั้นการเกิดพลาสติไซเซชันแบบนี้ คือ การเกิดโคพอลิเมอร์ระหว่างไวนิลคลอไรด์ มอนอเมอร์และมอนอเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ เช่น ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์กับไวนิลอะซิเตต ไวนิลอะซิเตตจะเข้าแทรกอยู่ในโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำให้สมมาตรของโมเลกุลเสียไป ดังนั้นพอลิไวนิลคลอไรด์จึงมีสมบัติยืดหยุ่น ไม่แตกง่าย พลาสติไซเซอร์ภายในชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ไวนิลลิดีนคลอไรด์ (Vinylidene chloride) ไดเอทิลฟูมาเรต (Diethyl fumarate) และไดเอทิลมาลีเอต (Diethyl maleate) เป็นต้น

ข) พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticisers) พลาสติไซเซอร์ประเภทนี้จะผสมกับพอลิเมอร์หรือละลายอยู่ในพอลิเมอร์ โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เป็นแบบไดโพล หรือระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่แสดงความมีขั้วและไม่มีขั้ว การเลือกชนิดพลาสติไซเซอร์ที่ใช้กับพอลิเมอร์ต้องพิจารณาความเข้ากันได้ คือ ต้องผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังต้องคงสภาพอยู่ในพอลิเมอร์ได้นานไม่ซึมและระเหยออกมา จากการที่พลาสติไซเซอร์ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ดังนั้นพอลิเมอร์จึงมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ความเปราะลดลงและไม่แตกง่าย

พลาสติไซเซอร์ภายนอกสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- พาทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate esters) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรม ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์กลุ่มนี้ คือ Di(2-ethylhexyl) phthalate ในทางอุตสาหกรรมนิยมเรียกว่าไดออกทิลพาทาเลต ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

- ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters) มีสมบัติช่วยป้องกันการติดไฟและลุกไหม้ของพอลิเมอร์ ได้แก่ Tricresyl phosphate

- สารประกอบอะดีเปต (Adipates) อะซีเลต (Azelates) โอลิเอต (Oleates) และซีบาแคต (Sebacates) นิยมใช้กับพอลิเมอร์ที่เตรียมจากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ณ อุณหภูมิต่ำ

- สารประกอบอีพอกซี เตรียมได้จากน้ำมันพืชและกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- เอสเทอร์ของกรดไขมันจากแหล่งธรรมชาติ ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticisers) หรือ Extender พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิจะมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ต่ำ เพราะเกิดแรงดึงดูดระหว่างพลาสติกไซเซอร์กับพอลิเมอร์น้อย นิยมใช้ร่วมกับพลาสติกไซเซอร์ที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์สูง

- อนุพันธ์ของไกลคอล นิยมใช้เป็นตัวหล่อลื่น และทาในแบบพิมพ์ช่วยให้พลาสติกไม่ติดแบบพิมพ์หลังการขึ้นรูป

- ซัลโฟนาไมด์ (Sulfonamides) นิยมใช้กับเซลลูโลสเอสเทอร์ พลาสติกจำพวกฟีนอลิก (Phenolics) และเอมีด (Amides)

- สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอนจัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ นิยมใช้ผสมกับพลาสติกไซเซอร์ตัวอื่น

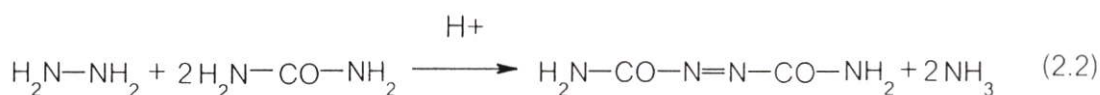
2.8.4 สารเพิ่มเนื้อ เป็นสารที่เติมเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารเพิ่มเนื้อยังช่วยลดปัญหาฟิวซีเกาะติดผนังเครื่องจักร ตัวอย่างสารเพิ่มเนื้อ เช่น ผงหินปูน แคลเซียมคาร์บอเนต และผงยางรถยนต์ เป็นต้น

2.8.5 สารให้ฟอง เป็นสารที่ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ สารให้ฟองแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการให้ฟองก๊าซ คือ

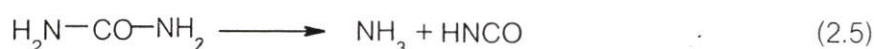
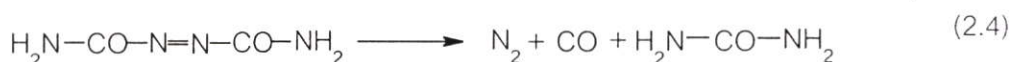
ก) สารให้ฟองที่ให้ฟองทางกายภาพ เป็นสารที่ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ความดัน และสถานะ สารให้ฟองที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน ก๊าซอัดความดัน (Compressed gases) เช่น ก๊าซไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

ข) สารให้ฟองที่ให้ฟองทางเคมี การให้ฟองจะต้องเกิดปฏิกิริยาและให้ก๊าซออกมาซึ่งก๊าซจะเข้าแทนที่ในเนื้อของพอลิเมอร์ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ สารให้ฟองชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ เกลือของสารคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต และสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบเอโซ (Azo compounds) และอนุพันธ์ของไฮดราซีน (Hydrazine derivatives)

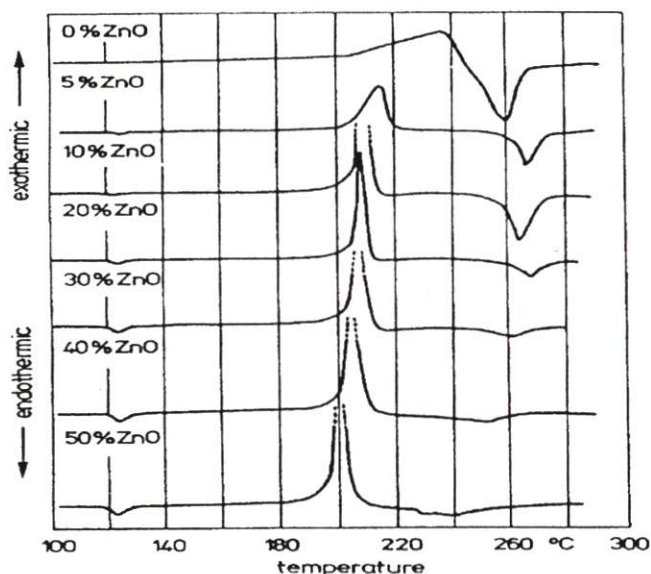
สารให้ฟองมีหลายชนิด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เพราะมีความเป็นพิษน้อยมาก เมื่อติดไฟสามารถดับได้เอง (Self-extinguishing) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารให้ฟองที่ให้ฟองทางเคมี มีสารประกอบเอโซเป็นองค์ประกอบ สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการรวมตัวของไฮดราซีน และยูเรีย เกิดไฮโดรโซไดคาร์โบนาไมด์ (Hydrozodicarbonamide) (ดังปฏิกิริยาที่ 2.2) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับสารพวกคลอรีน คลอเรต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือกรดไนตริกได้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (ดังปฏิกิริยาที่ 2.3)



เอโซไดคาร์โบนาไมด์มีลักษณะเป็นผงมีสีเหลือง ความหนาแน่น 1.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เกิดปฏิกิริยาสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 205-215 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซ 220 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม กลไกของปฏิกิริยาการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ แสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.4 และ 2.5 เอโซไดคาร์โบนาไมด์จะสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮดร่าซีน ซึ่งจะสลายตัวต่อได้ก๊าซแอมโมเนีย และกรดไซยานูริก (Cyanuric acid, HNCO)



เอโซไดคาร์โบนาไมด์เป็นสารให้ฟองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย แต่จะเกิดปฏิกิริยาสลายตัวให้ก๊าซที่อุณหภูมิสูง จึงไม่สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรทางความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารช่วยให้เอโซไดคาร์โบนาไมด์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง สารจำพวกนี้เรียกว่า "สารกระตุ้น" ตัวอย่างเช่น สารประกอบของตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ซึ่งปริมาณและชนิดของสารกระตุ้นจะมีผลต่อการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ รูปที่ 2.8 แสดงการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นในปริมาณต่าง ๆ ตรวจวัดโดยเครื่อง Differential Thermal Analyser (DTA) จะเห็นว่าเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่สลายตัวจะลดลงมากเมื่อเทียบกับไม่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ คือ จากประมาณ 238 องศาเซลเซียส เป็น 218 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิสลายตัวจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ อยู่ในช่วง 190-215 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.8 การสลายตัวของเฮไลโดคาร์บอนาไมด์ในพีวีซีเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ [13]

2.9 กระบวนการผสม (Compounding) [28, 38-42]

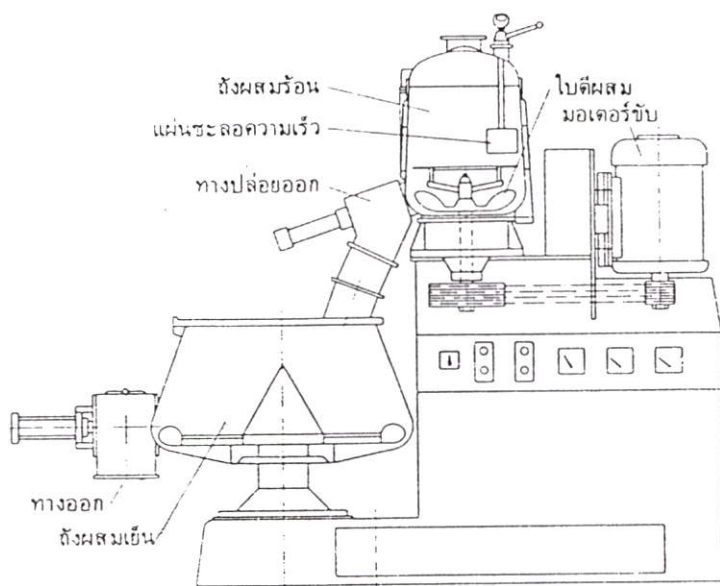
วิธีการผสมพีวีซีที่มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดกับสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ กระบวนการผสมแบบแบทช์ และกระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง

2.9.1 กระบวนการผสมแบบแบทช์ (Batch compounding)

กระบวนการผสมแบบแบทช์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้ คือ

ก) การผสมแบบแห้ง (Dry-blending of PVC compounding) เป็นกระบวนการผสมส่วนผสมต่าง ๆ ของพีวีซีแข็งให้เป็นคอมเปานด์ในรูปผง ในถังผสมร้อนมีใบกวนซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้ส่วนผสมผสมกันได้ดี นอกจากนี้ยังเกิดความร้อนเนื่องจากการเสียดทาน การผสมพีวีซีคอมเปานด์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความหนาแน่นรวม (Bulk or Packing density) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ผลผลิตในการหลอมอัดท้อสูง และโอกาสเกิดฟองอากาศในเนื้อท่อพีวีซีน้อย สมบัติทางกายภาพดี แต่ต้องระวังหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ส่วนผสมจับตัวเป็นก้อน (Agglomerate) ทำให้การไหลของตัวคอมเปานด์ไม่ดี อุณหภูมิผสมร้อนอยู่ในช่วง 80-150 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถังผสม ได้แก่ Ribbon mixer และเครื่องผสมความเร็วสูง (รูปที่ 2.9)

ข) การผสมโดยใช้เครื่องนวด (Kneader) เครื่องนวดประกอบด้วยเรือนทรงกระบอกวางอยู่ในแนวนอน มีใบนวดรูปตัว Z สองใบหมุนสวนทางกันอยู่ภายในเครื่องนวด (Inner-kneader) โดยพลาสติกจะรับความร้อนจากแท่งกระทุ้งที่กดพลาสติกอยู่ การนำพลาสติกออกจากเครื่องนวดทำได้โดยการเลื่อนแผ่นปิดด้านล่างซึ่งสามารถเลื่อนเข้าออกได้ ส่วนใหญ่ใช้ในการผสมพลาสติกที่ต้องการเติมสารผสมมาก ๆ



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมความเร็วสูง [28]

ค) การผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง การทำงานต้องมีคนควบคุมตลอดเวลา การหลอมผสมจะเกิดขึ้นระหว่างร่องของลูกกลิ้งร้อนสองลูก มีแกนขนานหมุนสวนทางกัน เพื่อให้การผสมดียิ่งขึ้นจะต้องคอยปาดส่วนของพลาสติกที่ไหลออกทางด้านข้างให้เข้าไปอยู่ตรงกลางของลูกกลิ้งร้อนเสมอ

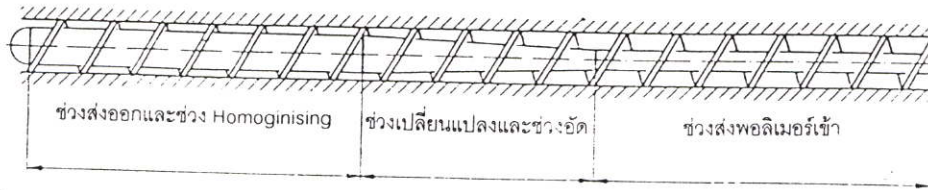
2.9.2 กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

การผสมใช้เครื่องอัดรีดซึ่งเป็นแบบเกลียวหนอนเดี่ยว หรือแบบเกลียวหนอนคู่ชนิดเกลียวหนอนหมุนทางเดียวกันหรือสวนทางกัน เกลียวหนอนเป็นส่วนสำคัญของเครื่องอัดรีด มีหน้าที่ป้อนพอลิเมอร์เหลวและผสมพอลิเมอร์ เกลียวหนอนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามช่วงการทำงาน (ดังรูปที่ 2.10) คือ

1) ช่วงส่งพอลิเมอร์เข้า (Feed zone) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ (Preheat) และลำเลียงพอลิเมอร์ไปยังส่วนต่อไป ส่วนนี้มีเฟืองค้อนข้างเล็ก พอลิเมอร์ที่เข้ามายังส่วนนี้จะอยู่ในรูปของแข็ง

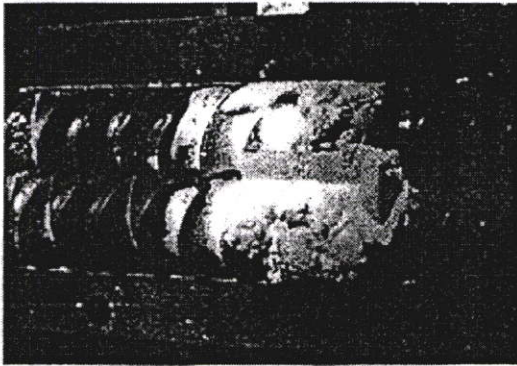
2) ช่วงเปลี่ยนแปลงและช่วงอัด (Compression zone หรือ Transition zone) ทำหน้าที่หลอมพอลิเมอร์ ความลึกของสกรูจะลดลงแบบเส้นตรงจากช่วงส่งพอลิเมอร์เข้า

3) ช่วงส่งออกและช่วง Homogenising เป็นส่วนที่ใกล้กับหัวฉีดท่อหรือหัวตาย (Pipe die) มีเฟืองตี้น พอลิเมอร์ที่อยู่ในส่วนนี้จะป้อนของเหลวทั้งหมด

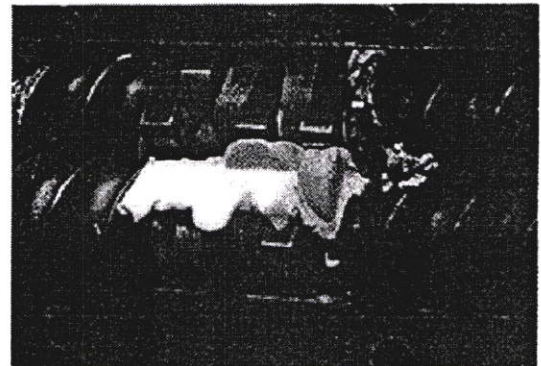


รูปที่ 2.10 การแบ่งช่วงเกลียวหนอนตามช่วงการทำงาน [28]

การผสมส่วนผสมของพีวีซีนิยมใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน เพราะเกิดความร้อนจากแรงที่ใช้ในการผสมน้อยกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว การผสมเกิดขึ้นโดยผงพีวีซีถูกรีดไปในร่องเกลียวเป็นคลื่นไปตามความยาวของตัวหนอน ทำให้เกิดการนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียว การผสมพีวีซีคอมเปานด์แสดงดังรูปที่ 2.11



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 การผสมพีวีซีคอมเปานด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน[42]

(ก) ช่วงส่งพอลิเมอร์เข้า

(ข) ช่วงเปลี่ยนแปลงและช่วงอัด

2.10 กระบวนการขึ้นรูป (Shaping) [28, 41-47]

การขึ้นรูปพอลิเมอร์ เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากพอลิเมอร์ที่เป็นเม็ดหรือเป็นผง ให้เป็นผลิตภัณฑ์ เทคนิคการขึ้นรูปพอลิเมอร์ ได้แก่ การอัดรีด (Extrusion) การฉีด (Injection moulding) การฉีดเป่า (Injection blow moulding) การอัดรีดเป่า (Extrusion blow moulding) การรีด (Calendering) การกดอัด (Compression moulding) การอัดถ่ายแบบ (Transfer moulding) และเทอร์โมฟอร์มมิง (Thermoforming) การเลือกใช้เทคนิคการขึ้นรูปมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาหลายประการ คือ

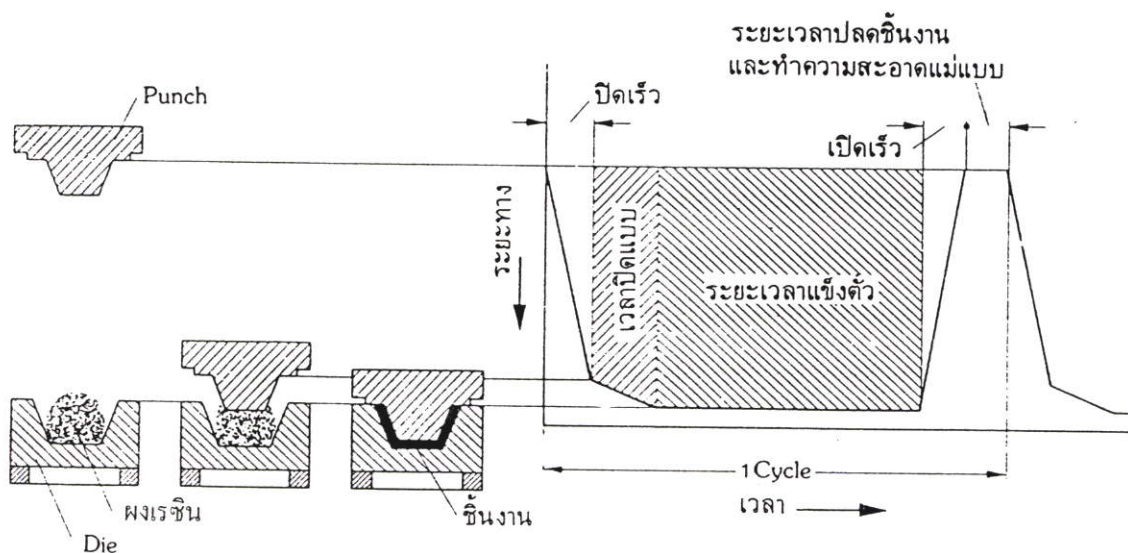
- 1) รูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

- 2) ชนิดของพอลิเมอร์
- 3) ความยากง่ายในการผลิต
- 4) ต้นทุนการผลิต

สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ การขึ้นรูปแบบกดอัดและแบบอัดรีด

2.10.1 การขึ้นรูปโดยการกดอัด

การกดอัด เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยนำผงเรซินมาอัดในแม่แบบภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม รูปที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการอัดตั้งแต่เริ่มต้นจนครบวัฏจักรในจังหวะเริ่มต้นนั้นแม่แบบตัวผู้ (Punch) และตัวเมีย (Die) จะแยกออกจากกันกว้างที่สุด เพื่อให้สามารถเติมผงเรซินได้ง่าย หลังจากทำการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แล้วแม่แบบตัวผู้และตัวเมียจะแยกออกจากกันอีกครั้งเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีนี้ได้แก่ จาน ชาม สวิตช์ไฟ ฯลฯ



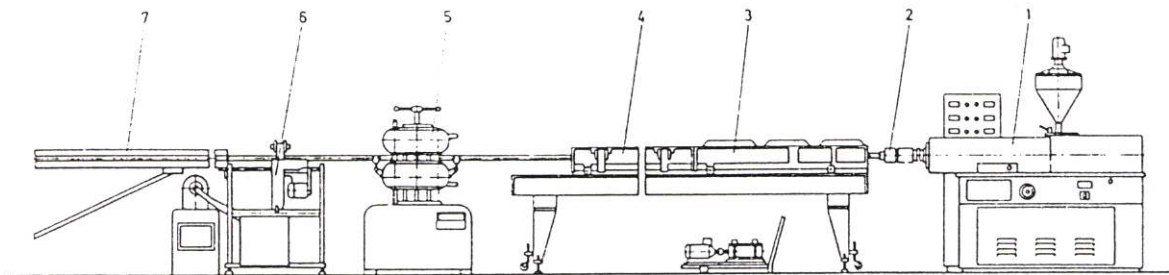
รูปที่ 2.12 แผนภูมิขั้นตอนการทำงานกดอัด [28]

การกดอัดพลาสติกโดยปกติจะเกิดก๊าซหรือไอน้ำที่ยังหลงเหลืออยู่ขึ้น ซึ่งอาจฝังตัวอยู่ใต้ผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดรอยปูดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผงพลาสติกที่ไม่ได้ทำการให้ความร้อนก่อนกดอัด จึงต้องมีจังหวะยกแม่แบบตัวผู้ขึ้นเพื่อไล่ก๊าซออก ซึ่งความดันจะลดลงเท่ากับความดันบรรยากาศ และเมื่อก๊าซระเหยออกไปแล้วจึงจะอัดต่อไปจนพลาสติกแข็งตัว

2.10.2 การผลิตท่อด้วยกระบวนการอัดรีด

การผลิตท่อจะใช้กระบวนการอัดรีดซึ่งประกอบด้วย เครื่องอัดรีด หัวฉีดท่อหรือหัวดาย อุปกรณ์ปรับขนาดท่อ อ่างน้ำหล่อเย็น อุปกรณ์ดึงท่อ อุปกรณ์ตัด และรางกระดกท่อ ดังรูปที่

2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตท่อ [28]

- (1) เครื่องอัดรีด (2) หัวฉีดท่อ (3) อุปกรณ์ปรับขนาดท่อ (4) อ่างน้ำหล่อเย็น
(5) อุปกรณ์ดึงท่อ (6) อุปกรณ์ตัด (7) รางกระดกเทท่อ

1) เครื่องอัดรีด การเลือกใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหรือเกลียวหนอนคู่ขึ้นอยู่กับลักษณะของพลาสติก ถ้าพลาสติกเป็นเม็ดจะเลือกใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ส่วนพลาสติกเป็นผงจะเลือกใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

2) หัวฉีดท่อ ในการผลิตท่อต้องใช้หัวดายที่มีแท่งขวางภายในช่องว่างเพื่อแยกพลาสติกออกให้ไหลตามช่องว่างแคบ ๆ ซึ่งพลาสติกเหลวเหล่านี้จะไหลมารวมเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งโดยผ่านช่องอัดที่มีลักษณะเป็นคอคอดที่ช่องทางไหล (ดังรูปที่ 2.14)

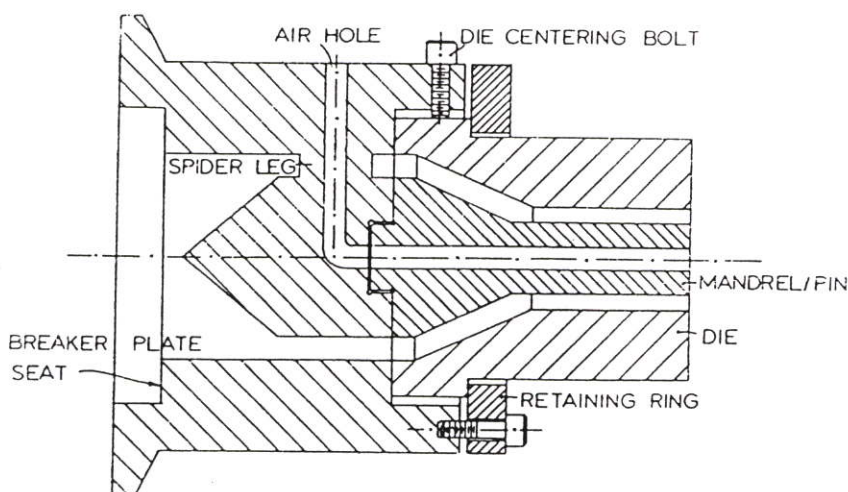
3) อุปกรณ์ปรับขนาดท่อ ทำหน้าที่รักษารูปร่างหน้าตัดของท่อให้คงที่จนกว่าท่อขึ้นรูปจะแข็งตัว โดยทั่วไปจะปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ เทคนิคการปรับขนาดที่นิยมใช้ คือ การปรับขนาดโดยใช้สุญญากาศ และแบบใช้ลมอัด

4) อ่างน้ำหล่อเย็น ขณะปรับขนาดท่อมีการหล่อเย็นไปด้วยแต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้ท่อคงรูปอยู่ได้ ดังนั้นจึงต้องนำท่อที่ขึ้นรูปได้มาผ่านกระบวนการหล่อเย็นอีกครั้งหนึ่ง สารหล่อเย็นที่ใช้ได้แก่ น้ำ และอากาศ

5) อุปกรณ์ดึงท่อ ทำหน้าที่ดึงท่อให้เคลื่อนไปข้างหน้าด้วยความเร็วคงที่ โดยสัมพันธ์กับอัตราการอัดรีด นิยมใช้อุปกรณ์ดึงท่อแบบตีนตะขาบ

6) อุปกรณ์ตัด ทำหน้าที่ตัดท่อให้มีขนาดเหมาะสมเพื่อสะดวกต่อการเก็บและขนส่ง อุปกรณ์ตัดที่นิยมใช้ ได้แก่ เลื่อย ไขมีด และกรรไกร

7) รางกระดกเทท่อ ใช้ลำเลียงท่อออกจากกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.14 หัวฉีดท่อหรือหัวตาย [44]

2.11 การแตกหักของพอลิเมอร์ [43]

การแตกหัก (Fracture) เป็นการเสียสภาพที่ร้ายแรงทำให้อายุการใช้งานพอลิเมอร์สั้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะพัฒนา พอลิเมอร์ให้มีความแข็งแรงสูง เหนียว ไม่เสียสภาพจากการแตกหักง่าย

พอลิเมอร์คล้ายแก้ว (Glassy polymers) จะแข็งแต่เปราะ แตกหักที่ความเครียด (Strain) ต่ำ เกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation) น้อย ส่วนพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymers) ส่วนมากจะเหนียว (Ductile) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิลอมเหลวมักเกิด Cold-drawing ก่อนการเสียสภาพ ในขณะที่ยางสามารถดึงยืดได้หลายเท่า แต่จะขาดที่ความเครียดต่ำถ้ามีรอยตัดปรากฏอยู่

การแตกหักแบบเปราะเป็นกระบวนการเสียสภาพที่ใช้พลังงานต่ำ เกิดกับพอลิเมอร์ที่ความเครียดต่ำ โดยมากเกิดกับชิ้นงานทดสอบพอลิเมอร์ที่มีตำหนิหรือรอยร้าว ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูง (Stress concentration) แรงจะทำให้เกิดการขยายของรอยร้าวและทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะในที่สุด การเริ่มต้นของรอยแตก อาจเนื่องจาก

- พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ (Polymer degradation)
- รอยขีดข่วนบนผิว, Crazeing, สิ่งสกปรก
- ความเค้นตกค้าง (Residual stress)
- มุมหักของชิ้นงานทดสอบ
- ก้อนเม็ดสี สารเติมเนื้อ ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงาน
- รอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ (Imperfect joints) เป็นต้น

การแตกหักแบบเปราะสามารถอธิบายได้โดยใช้ "ทฤษฎีการแตกหักของกริฟฟิท" (Griffith's fracture theory) ซึ่งกล่าวว่า

- การแตกหักของพอลิเมอร์เกี่ยวข้องโดยตรงกับรอยแตก หรือตำหนิในพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก

- เมื่อเกิดการแตกหัก พลังงานที่ใช้เพิ่มความยาวของรอยแตกเพื่อให้เกิดพื้นผิวใหม่จะต้องสมดุลกับการลดลงของพลังงานศักย์ของพอลิเมอร์ที่ได้รับแรง

- ความแข็งแรงแตกหัก (Fracture strength) ของพอลิเมอร์ จะแปรผกผันกับความยาวของรอยบาก (Notch) หรือตำหนิ

งานวิจัยนี้ผสมผสานการทดลองกับพีวีซี โดยใช้พีวีซีเป็นวัสดุต่อเนื่อง (Continuous phase) ซึ่งเมื่อเติมผงยางรถยนต์ลงในพีวีซีจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด โมดูลัส และความแข็งกดเปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยทฤษฎีการแตกหักของกริฟฟิท แต่อย่างไรก็ตามจะต้องพัฒนาสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ของท่อน้ำซึม เช่น โดยการเติมสารช่วยผสม การหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างผงยางรถยนต์กับพีวีซีที่เหมาะสม เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำท่อน้ำซึมไปใช้ได้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ จากบริษัทวินิไทย จำกัด (มหาชน) ธรรมชาติความหนืด 102 ลูกบาศก์เดซิเมตร/กิโลกรัม K-value เท่ากับ 64 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent bulk density) 0.5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.2 ผงยางรถยนต์ จากบริษัทแสงไทยผลิตยาง จำกัด ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง ขนาด 10, 20 และ 30 เมช

3.1.3 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน BPR-20 จากบริษัทสยามสเดบิลไฮเซอร์ จำกัด เป็นผงละเอียด ประกอบด้วยตะกั่วออกไซด์ 61.2 ± 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนาแน่น 0.65 ± 0.15 0.5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.4 กรดสเตียริก จากบริษัท พี. แอนด์ เอ็น. แอสโซซิเอท จำกัด

3.1.5 Cereclor S52 จากบริษัท ไอ ซี ไอ เอเชียติก เคมีภัณฑ์ จำกัด เป็นของเหลวสีเหลืองใส คลอรีนเป็นองค์ประกอบ 50.0-53.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 10-20 พอยส์ ความหนาแน่น $1.23-1.27 \pm 0.5$ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.6 ไดออกทิลพาทาเลต (Dioctyl phthalate, DOP) จากบริษัท เซาท์ซีตีปีโตรเคมี จำกัด

3.1.7 เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) จากบริษัท ยูซาโก (ไทยแลนด์) จำกัด เป็นผงสีเหลือง สลายตัวที่อุณหภูมิ 202-206 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายตัวเท่ากับ 225-250 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม

3.1.8 ซิงค์ออกไซด์ จากบริษัท พี. แอนด์ เอ็น. แอสโซซิเอท จำกัด

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องผสมความเร็วสูง	Lab Tech; UMX1000
เครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง	Lab Tech; LPM200
เครื่องอัดรีดแบบเกลียวท่อนอนเดี่ยว	Axon Plastmaskiner ab; BX-18
เครื่องบดเม็ด (Grinder)	Bosco engineering; Bosco A600
เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด	Lab Tech; LP20
เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile tester)	Lloyd; LR30K
เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness, shore A)	Societa per azioni milano/itia
เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)	Perkin Elmer; DSC7
Thermogravimetric Analyser (TGA)	Shimadzu; TGA - 51
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)	CamScan; Maxim 2000
เวอร์เนียร์คาลิเปอร์	-
เครื่องชั่งแบบดิจิตอล	Diethelm; HR - 200
หัวดายท้อ (ภาคผนวก ง)	-
เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ	-

3.3 การทดลอง

3.3.1 สูตรที่ใช้เตรียมชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำซึม

ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรที่ใช้เตรียมพีวีซีคอมปานด์เพื่อใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม และสูตรที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมมีดังนี้

สูตรที่ 1 สภาวะขึ้นรูป ศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาขึ้นรูปของพีวีซีคอมปานด์ ซึ่งจะไม่เต็มผยงารถยนต์ เพื่อให้สามารถสังเกตสีของแผ่นพีวีซีคอมปานด์ว่าเกิดการไหม้หรือไม่ ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปนั้น

สูตรที่ 2 ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างผยงารถยนต์กับพีวีซี แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงารถยนต์กับพีวีซี ไม่เต็มเอโซไดคาร์โบนาไมด์และซิงค์ออกไซด์ เพราะต้องการสังเกตความเข้ากันได้ระหว่างผยงารถยนต์กับพีวีซี และเนื่องจากใช้ BPR-20 ซึ่งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้แคลเซียม/ซิงค์

สูตรที่ 3 เปลี่ยนปริมาณไดออกทิลพาทาเลตเพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยให้ส่วนผสมอื่น ๆ ในสูตรที่ 2 คงที่ สำหรับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงารถยนต์ต่อพีวีซีทดลองใช้ 60/40 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดจากผลการทดลองของเบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ และคณะ ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และคณะ

และสัจจะชัย สัจจะระณะสกุล ซึ่งทดสอบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [9-11] ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมช เนื่องจากเป็นขนาดผงยางรถยนต์ที่ ให้ผลิตท่อน้ำซึมในเชิงการค้า [6]

สูตรที่ 4 เปลี่ยนปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์โดยให้ส่วนผสมอื่น ๆ คงที่ เลือกใช้ปริมาณ ไดออกทิลพาทาเลตที่ดีที่สุดจากสูตรที่ 3 และทดลองใช้แคลเซียม/ซิงค์เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทาง ความร้อนแทน BPR-20 ดังนั้นจึงต้องเพิ่มกรดสเตียริกซึ่งเป็นสารหล่อลื่นจาก 1 phr เป็น 2 phr เพราะในแคลเซียม/ซิงค์ไม่มีสารหล่อลื่น

สูตรที่ 5 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี และผลของซิงค์ออกไซด์ การเติมและไม่เติมซิงค์ออกไซด์โดยให้ส่วนผสมอื่น ๆ คงที่ เลือกใช้ปริมาณไดออกทิลพาทาเลตที่ดีที่สุดจากสูตรที่ 3 และปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์จากสูตรที่ 4

สูตรที่ 6 เปลี่ยนขนาดผงยางรถยนต์ โดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 10, 20 และ 30 เมช โดยส่วนผสมอื่น ๆ คงที่ เลือกใช้ปริมาณไดออกทิลพาทาเลตที่ดีที่สุดจากสูตรที่ 3 ปริมาณเอโซ ไดคาร์โบนาไมด์จากสูตรที่ 4 ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี และปริมาณของ ซิงค์ออกไซด์จากสูตรที่ 5

สูตรที่ 7 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม เลือกปริมาณสารต่าง ๆ ที่ดีที่สุดจากสูตรที่ 1-6 ใช้ในการ ขึ้นรูปท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีด

3.3.2 การเตรียมพีวีซีคอมปานด์

นำพีวีซีเรซิน ผงยางรถยนต์ และสารเติมแต่งต่าง ๆ จากหัวข้อ 3.3.1 ผสมในเครื่องผสม ความเร็วสูงใช้ความเร็วรอบ 4,000 รอบ/นาที อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นชั่งพีวีซีคอมปานด์ประมาณ 400 กรัม เติลงลงในเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้งเพื่อ หลอมผสม ที่อุณหภูมิหลอมผสมประมาณ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที (เป็นอุณหภูมิและ เวลาที่สังเกตได้จากการทดลองว่าพีวีซีคอมปานด์หลอมเหลวและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน) แล้วจึง บดแผ่นพีวีซีคอมปานด์ที่ได้ให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ ด้วยเครื่องบดเม็ดเพื่อเตรียมขึ้นรูปต่อไป

3.3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สภาวะการขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบมีดังนี้

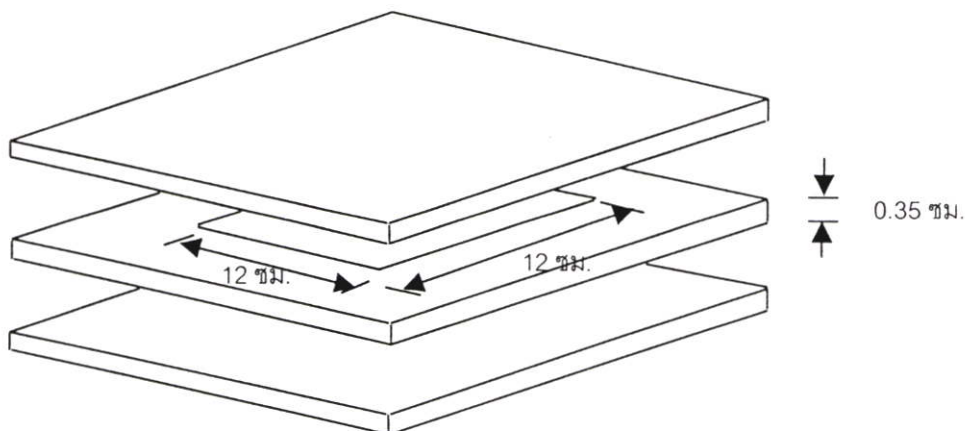
ก) สภาวะการขึ้นรูป ขึ้นรูปพีวีซีคอมปานด์ที่เตรียมจากสูตรที่ 1 ในตารางที่ 3.2 เป็น แผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200, 210, 220 และ 230 องศาเซลเซียส ด้วยแรงกดอัด 10.34 MPa เพื่อหาอุณหภูมิการขึ้นรูปที่เหมาะสม ที่เวลาการขึ้นรูปเบื้องต้น 4 นาที ซึ่งเป็นเวลาการ ขึ้นรูปทั่วไป จากนั้นขึ้นรูปพีวีซีคอมปานด์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้เป็นเวลา 3, 4 และ 5 นาที เพื่อหาเวลาการขึ้นรูปที่ดี

ตารางที่ 3.2 สูตรที่ใช้เตรียมชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำดื่ม

สูตรที่	อัตราส่วนผสม น้ำหนักของผงยาง รถยนต์ต่อฟิวซี	BPR-20*	แคลเซียม/ ซิงค์*	กรด สเตียริก*	Cereclor*	ไดออกไซด์ พาทาเลต*	เอซีไดคาร์ โบนาไมต์*	ซิงค์ ออกไซด์*	ขนาดผงยาง รถยนต์ (เมช)
1	0/100	5	-	1	5	40	-	-	-
2	0/100, 10/90, ..., 90/10	5	-	1	5	40	-	-	30
3	60/40	5	-	1	5	30, 40, 50	-	-	30
4	60/40	-	12	2	5	จากสูตรที่ 3	2, 4, 10, 14		30
5	50/50, 60/40 ..., 90/10	5	-	1	5	จากสูตรที่ 3	จากสูตรที่ 4	0, 5	30
6	จากสูตรที่ 5	5	-	1	5	จากสูตรที่ 3	จากสูตรที่ 4	จากสูตรที่ 5	10, 20, 30
7	จากสูตรที่ 5	5	-	1	5	จากสูตรที่ 3	จากสูตรที่ 4	จากสูตรที่ 5	จากสูตรที่ 6

หมายเหตุ * ใช้หน่วย phr (Part per hundred parts of resins)

ข) ชิ้นรูปขึ้นงานทดสอบจากสูตรที่ 2-6 ในตารางที่ 3.2 ตามสภาวะการขึ้นรูปในข้อ ก แม่พิมพ์ที่ใช้มีขนาด กว้าง×ยาว×หนา เท่ากับ 12×12×0.35 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบเป็นแผ่น

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ

ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ แสดงเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน คำนวณได้จากสมการที่ 3.1-3.4 [48]

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (3.4)$$

เมื่อ x_i = ข้อมูล

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

n = จำนวนของข้อมูล

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

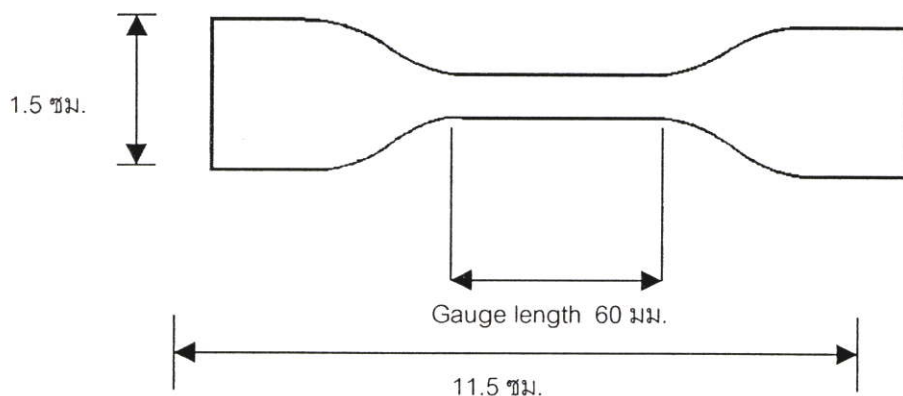
$\hat{\sigma}_x$ = Standard error

CV = สัมประสิทธิ์การกระจาย (Coefficient of variation)

สมบัติต่าง ๆ ที่ทดสอบ มีดังนี้

ก) การทดสอบสมบัติการดึงยึด ตามมาตรฐาน ASTM D638 (ภาคผนวก จ) ใช้ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ (ดังรูปที่ 3.2) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Lloyd; LR30K) ภายใต้สภาวะทดสอบดังนี้

Load cell	1	kN
Test speed	50	มิลลิเมตร/นาที
Gauge length	60	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์

ใช้ชิ้นงานทดสอบ 15 ชิ้น ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติการดึงยึด ได้แก่

1) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, TS) คำนวณค่าความแข็งแรงดึงจาก

สมการที่ 3.5

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

เมื่อ σ = ค่าความแข็งแรงดึง (MPa หรือ N/mm²)

F = แรงที่ใช้ดึง (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกดึงยึด (ตารางมิลลิเมตร)

2) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Percent elongation at break, % EB)

คำนวณจากสมการที่ 3.6

$$\% EB = \frac{(l - l_0)}{l_0} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ % EB = เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์)

l_0 = ความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ได้รับแรงดึงมีค่าเท่ากับ Gauge length (มิลลิเมตร)

l = ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังได้รับแรงดึง (มิลลิเมตร)

3) มอดุลัส (Modulus) ในงานวิจัยนี้เป็นค่ามอดุลัสที่จุดเริ่มต้น (Initial modulus)

คำนวณจากสมการที่ 3.7

$$E = \frac{Fl_0}{A(l - l_0)} \quad (3.7)$$

เมื่อ E = มอดุลัส (MPa หรือ N/mm^2)

ข) ความแข็งกด (Hardness) ทดสอบด้วยเครื่อง Durometer hardness (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 (ภาคผนวก จ) ในงานวิจัยใช้ชิ้นงานทดสอบ 15 ชิ้น

ค) ความหนาแน่น หาได้โดยชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ แล้วคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการที่ 3.8

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.8)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบ (กรัม)

V = ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ง) การซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) ใช้มาตรฐาน ISO 9261:1991 (ภาคผนวก จ) ความดันน้ำ 5×10^{-3} MPa (ความดันเกจ) เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำแสดงดังรูปที่ 3.3 ใช้ชิ้นงานทดสอบ 6 ชิ้น



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

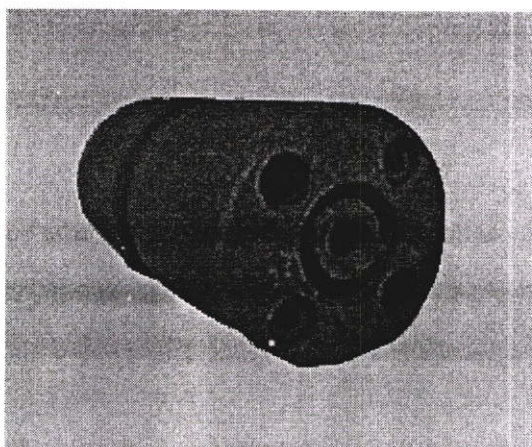
จ) สมบัติทางความร้อน งานวิจัยนี้ศึกษาอุณหภูมิที่เอโซไดคาร์บอนาไมด์สลายตัวด้วยเครื่อง TGA และ DSC ใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที เครื่อง TGA แสดงผลด้วยการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนด้วยอัตราคงที่ ส่วนเครื่อง DSC แสดงผลด้วยการเปลี่ยนแปลงความร้อนเมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อน

ฉ) สันฐานวิทยา ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แท้ชิ้นงานทดสอบในไนโตรเจนเหลว 10 นาที แล้วหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ไม่เกิดการยึดตัวของพอลิเมอร์ ทำให้สังเกตพื้นผิวของชิ้นงานได้ชัดเจน สำหรับพื้นที่รูปพรุนของ SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบหาโดยใช้โปรแกรม AutoCAD (ภาคผนวก ง)

3.3.5 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม

ขึ้นรูปท่อน้ำซึมจากสูตรที่ 7 ในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว ใช้หัวฉีดท่อดังรูปที่ 3.4 โดยมีสภาวะการขึ้นรูป ดังนี้

ไซน 1	180	องศาเซลเซียส
ไซน 2	200	องศาเซลเซียส
ไซน 3	210	องศาเซลเซียส
ไซน 4	190	องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบของสกรู	15	รอบ/นาที



รูปที่ 3.4 หัวฉีดท่อที่ใช้ขึ้นรูปท่อในงานวิจัยนี้

3.3.6 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม

การทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึม สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และ
สัณฐานวิทยา ทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบชิ้นงานทดสอบในข้อ 3.3.4

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การนำเสนอผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาสภาวะในการขึ้นรูป และสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ “แบบจำลองท่อน้ำซึม” สำหรับส่วนที่สองเป็นการขึ้นรูปท่อน้ำซึมและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.1 ผลการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแบบจำลองท่อน้ำซึมเพื่อใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม

ตัวแปรที่ศึกษา คือ

- 4.1.1 สภาวะการขึ้นรูป
- 4.1.2 ความเข้ากันระหว่างผงยางรถยนต์กับพีวีซี
- 4.1.3 ปริมาณไดออกซิลพาทาเลต
- 4.1.4 ปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์
- 4.1.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีและผลของการเติมซิงค์ออกไซด์
- 4.1.6 ขนาดผงยางรถยนต์

4.1.1 สภาวะการขึ้นรูป

พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรความร้อน จึงจำเป็นต้องเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เพื่อช่วยทำให้พีวีซีสามารถทนความร้อนได้ขณะขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ แต่การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะทำให้พีวีซีทนต่อความร้อนได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปสูงเกินไป พีวีซีจะเกิดการไหม้หรือสลายตัว ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ด้วยตาเปล่า คือ ชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือเกิดรอยไหม้

ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบควรอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เอโซโดคาร์โบนาไมด์เกิดปฏิกิริยาสลายตัวให้ก๊าซ ผลจากเครื่อง TGA ในภาคผนวก ข รูปที่ ข-1(ก) พบว่าเอโซโดคาร์โบนาไมด์สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 183-223 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 215 องศาเซลเซียส ดังผลจาก DSC ในภาคผนวก ข รูปที่ ข-2(ก)

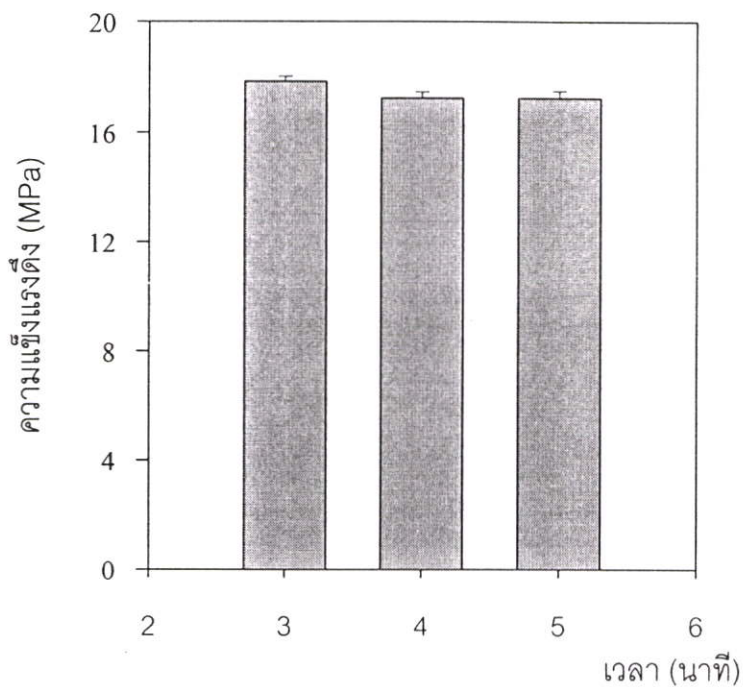
ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นพีวีซีคอมเปานด์ ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดที่อุณหภูมิ 200, 210, 220, และ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีบางส่วนที่ยังไม่หลอม ส่วนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิตั้งแต่ 220 องศาเซลเซียส แผ่นพีวีซีคอมเปานด์เกิดการไหม้บางส่วน ดังนั้นอุณหภูมิที่

เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพีวีซีคอมปานด์ คือ 210 องศาเซลเซียส เพราะพีวีซีคอมปานด์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นและไม่เกิดรอยไหม้

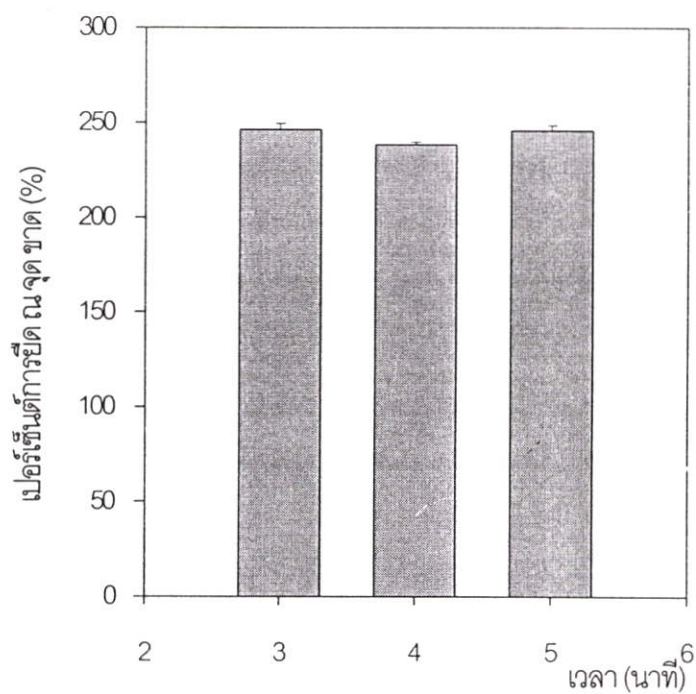
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นพีวีซีคอมปานด์ (ไม่เติมผงยางรถยนต์) ขึ้นรูปโดยวิธีกดอัดที่อุณหภูมิ 200, 210, 220 และ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะของแผ่นพีวีซีคอมปานด์
200	สีขาวขุ่นมีบางส่วนที่ยังไม่หลอม
210	สีขาวขุ่นเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแผ่น
220	สีเหลืองอ่อนเป็นบางส่วน
230	บางส่วนเกิดการไหม้

จากอุณหภูมิการขึ้นรูปที่เหมาะสม คือ 210 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการขึ้นรูป 3, 4 และ 5 นาที ทดสอบความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น ได้ผลดังรูปที่ 4.1(ก)-4.1(จ) พบว่าที่เวลาต่าง ๆ ดังกล่าว ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของแผ่นพีวีซีคอมปานด์ด้วยตาเปล่า พบว่าแผ่นพีวีซีคอมปานด์ที่ใช้เวลาขึ้นรูปนาน 3 นาที มีบางส่วนที่ยังไม่หลอม สำหรับแผ่นพีวีซีคอมปานด์ที่ขึ้นรูปนาน 4 นาที หลอมเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เกิดรอยไหม้ ส่วนแผ่นพีวีซีคอมปานด์ที่ใช้เวลาขึ้นรูปนาน 5 นาที มีบางส่วนของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 4 นาที

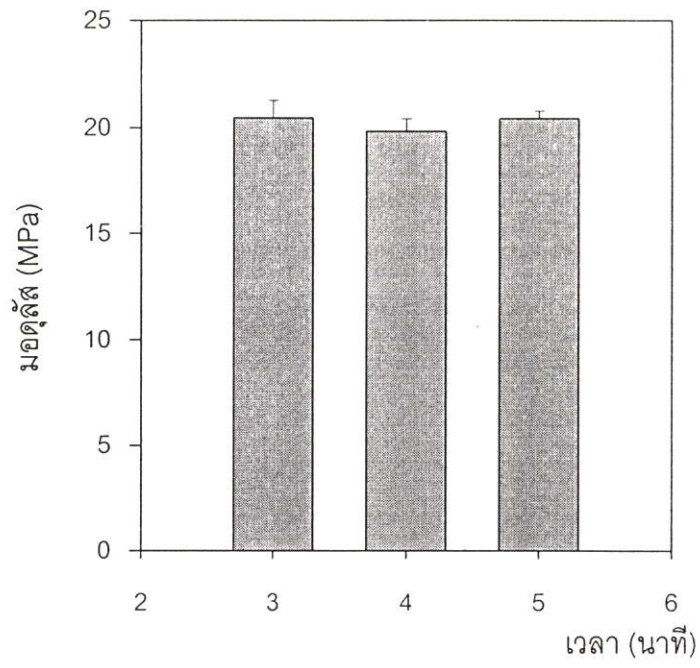


(ก) ความแข็งแรงดึง

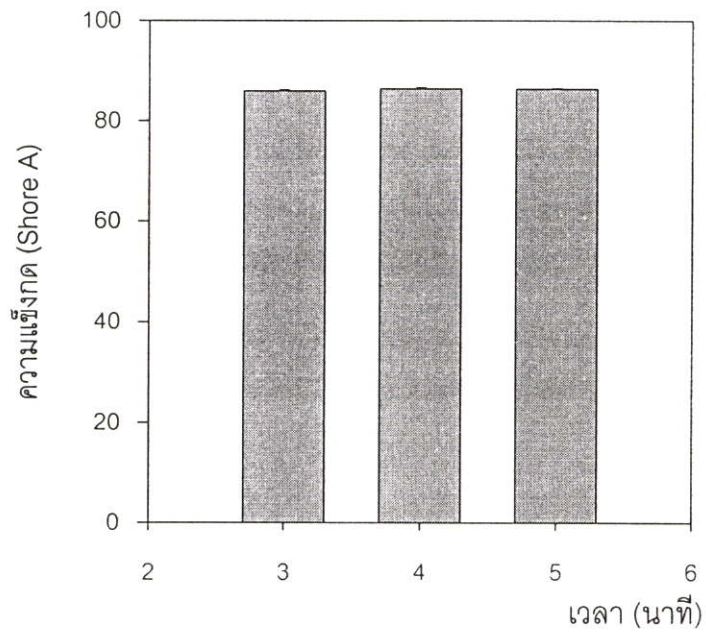


(ข) เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมปานด์กับระยะเวลาการขึ้นรูป (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr ไม่เติมเอโซไดคาร์โบนาไมด์ ผงยางรถยนต์ และ ซิงค์ออกไซด์ อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 องศาเซลเซียส)

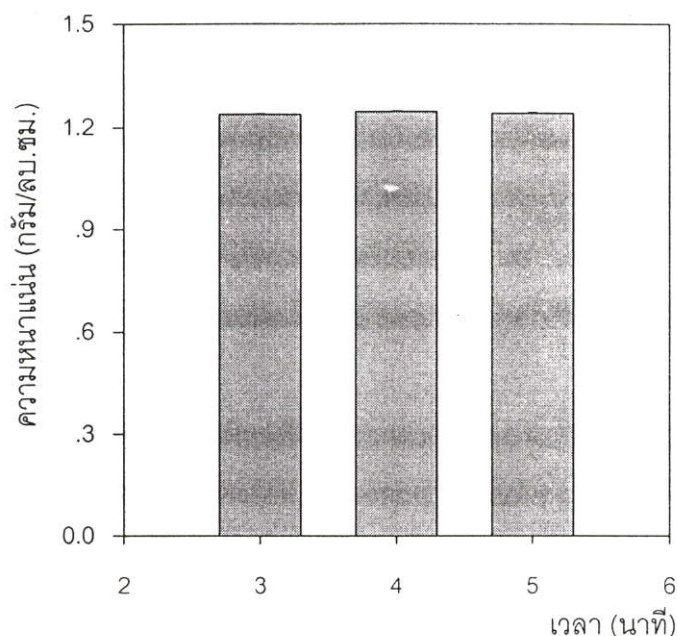


(ค) มอดุลัส



(ง) ความแข็งกด

รูปที่ 4.1 (ต่อ)



(จ) ความหนาแน่น

รูปที่ 4.1 (ต่อ)

4.1.2 ความเข้ากันได้ระหว่างผยงรถยนต์กับพีวีซี

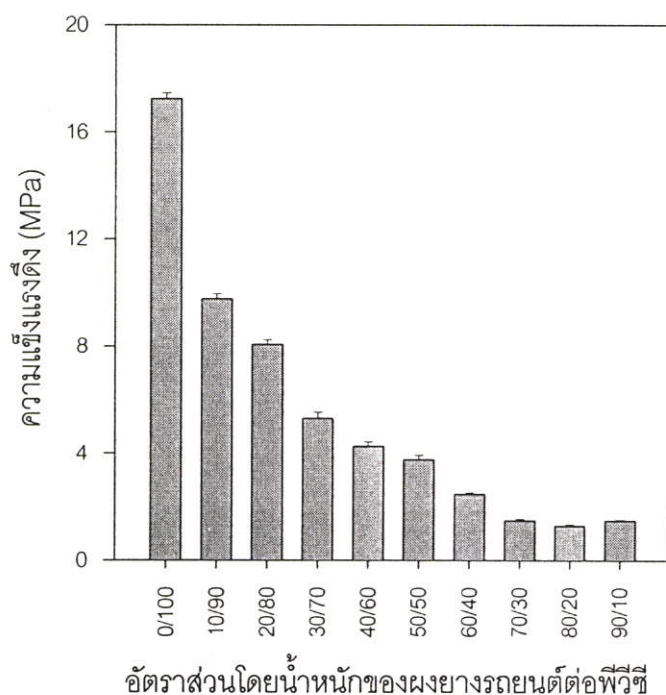
จากการสังเกตด้วยสายตาเปล่าพบว่าผยงรถยนต์และพีวีซีเข้ากันได้ดีในทุกอัตราส่วน เนื่องจากผยงรถยนต์ประกอบด้วยยางธรรมชาติซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้วเล็กน้อยจึงยึดเกาะกับหมู่ฟังก์ชันของพีวีซีได้ สามารถนำผยงรถยนต์ผสมกับพีวีซีได้มากจนปริมาณผยงรถยนต์ถึง 90 ส่วนและพีวีซี 10 ส่วน จากส่วนผสมสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.2 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงรถยนต์ต่อพีวีซีกับความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น เมื่อใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 องศาเซลเซียส นาน 4 นาที ดังรูปที่ 4.2(ก)-4.2(จ)

จากรูปที่ 4.2(ก), 4.2(ง) และ 4.2(จ) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง ความแข็งกด และความหนาแน่นจะลดลง เนื่องจากผยงรถยนต์เป็นก้อนของแข็งที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติ และทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ ส่วนพีวีซีเป็นวัสดุภาคที่ต่อเนื่องทำหน้าที่เป็นสารยืด ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น ปริมาณพีวีซีซึ่งเป็นวัสดุภาคต่อเนื่องน้อยลงทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานทดสอบ มีบางส่วนเกิดเป็นช่องว่างระหว่างผยงรถยนต์กับผยงรถยนต์ และผยงรถยนต์กับพีวีซี ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความแข็งแรงดึงและความหนาแน่นลดลง นอกจากนี้ผยงรถยนต์ยังมีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง ส่วนพีวีซีมีสมบัติเป็นพลาสติกจึง

มีความแข็งแรงมากกว่า ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงลดลง

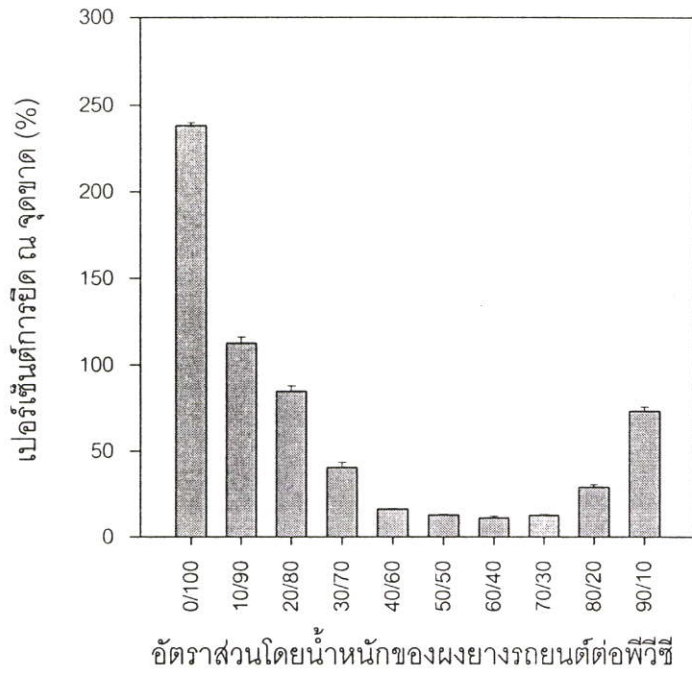
จากรูปที่ 4.2(ข) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง เพราะการเติมผงยางรถยนต์จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานทดสอบ แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะก้อนผงยางรถยนต์ซึ่งเป็นของแข็ง มีมอดุลัสต่ำ ยึดหยุ่นได้

จากรูปที่ 4.2(ค) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีน้อยกว่า 40/60 มอดุลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 40/60 มอดุลัสจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพีวีซีมีสมบัติเป็นพลาสติก มีค่ามอดุลัสมากกว่าผงยางรถยนต์

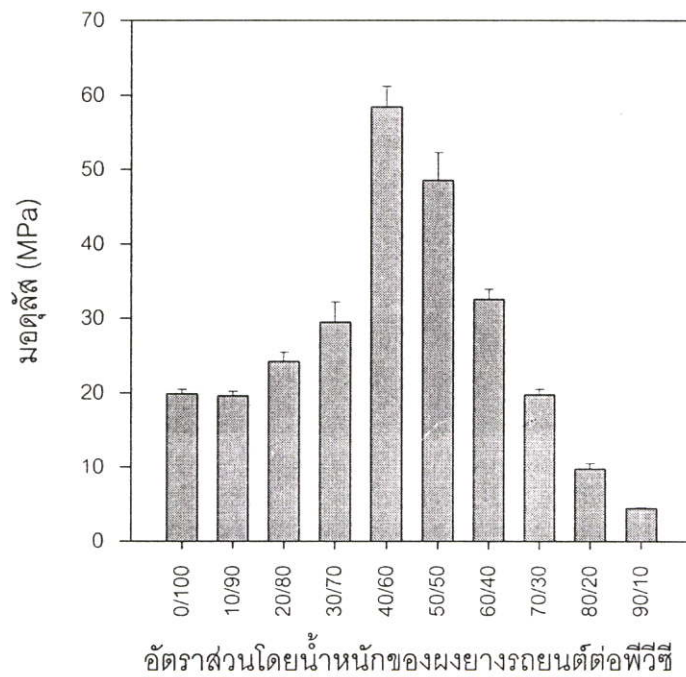


(ก) ความแข็งแรงดึง

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr ไม่เติมเอซีไดคาร์โบนาไมด์และซิงค์ออกไซด์)

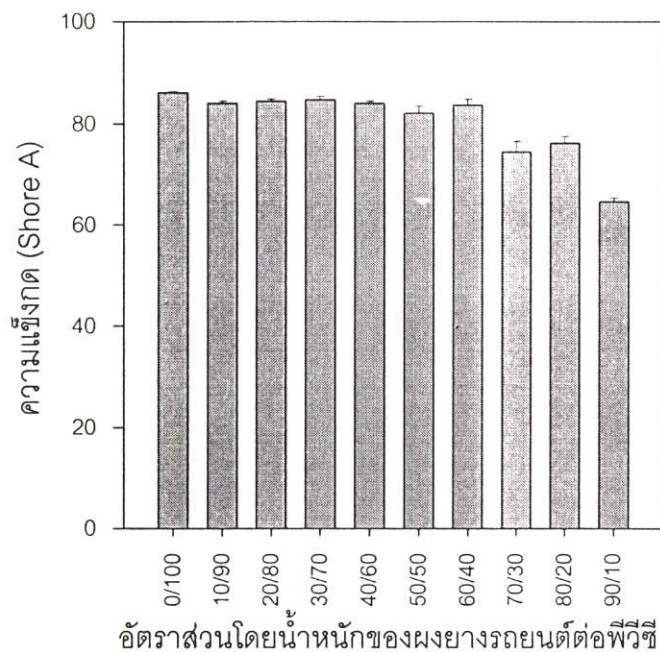


(ข) เปอร์เซ็นต์การยัด ผน จุดขาด

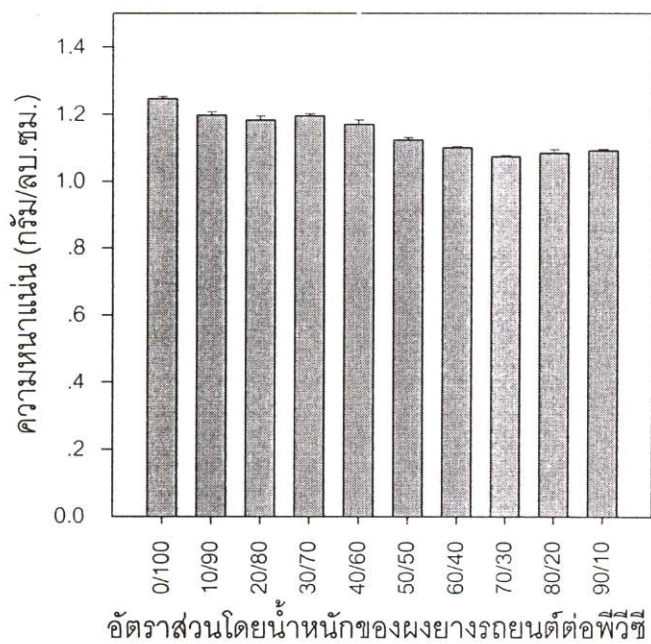


(ค) มอดุลัส

รูปที่ 4.2 (ต่อ)



(ง) ความแข็งกต



(จ) ความหนาแน่น

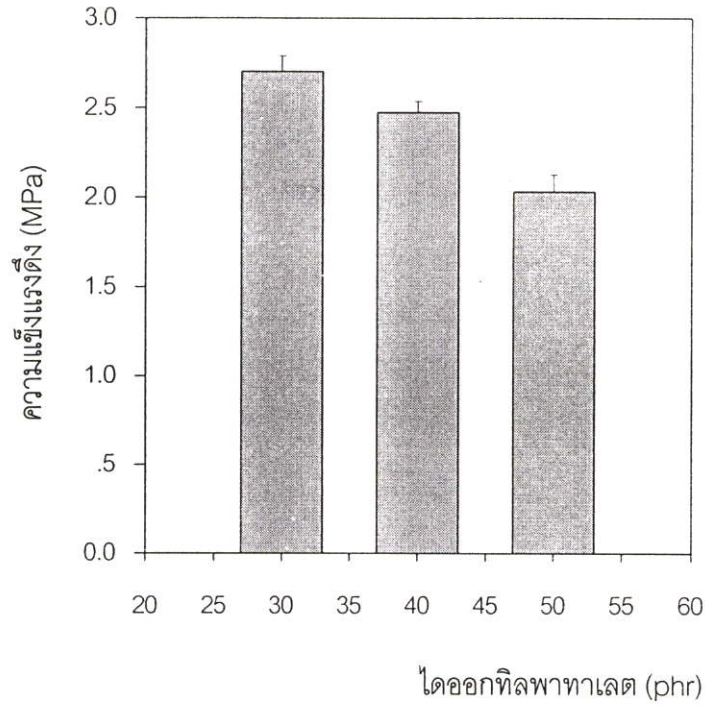
รูปที่ 4.2 (ต่อ)

4.1.3 ปริมาณไดออกทิลพาทาเลต

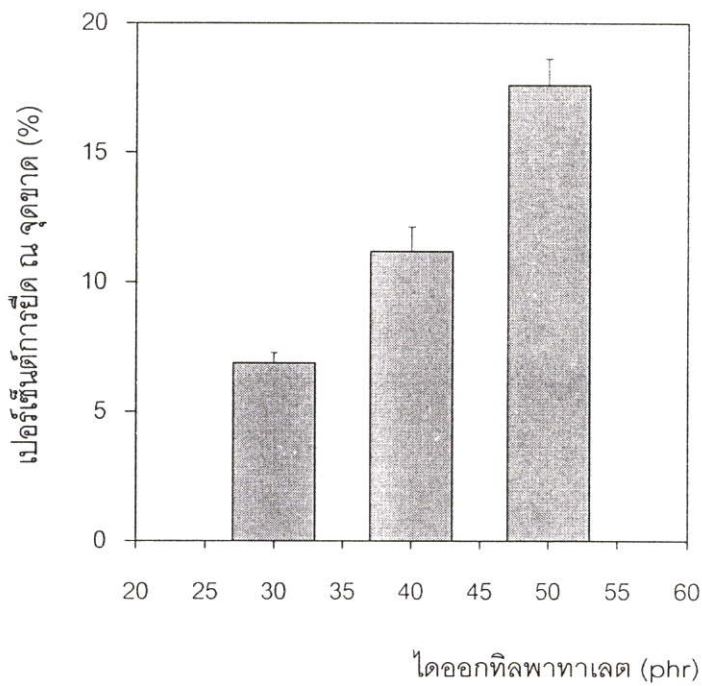
ปริมาณไดออกทิลพาทาเลตมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพ่อน้ำซีม จากส่วนผสมสูตรที่ 3 ในตารางที่ 3.2 จะได้ความสัมพันธ์ของปริมาณไดออกทิลพาทาเลตกับความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น เมื่อใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ดังรูปที่ 4.3(ก)-4.3(จ)

จากรูปที่ 4.3(ก)-4.3(ง) เมื่อปริมาณไดออกทิลพาทาเลตเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกด จะมีค่าลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากไดออกทิลพาทาเลตทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เข้าแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พีวีซีที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือบริเวณอสัณฐานทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ลดลง (อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ลดลง) ส่งผลให้การติดกันระหว่างสายโซ่ลดลง ปริมาตรอิสระ (Free volume) และการหมุนของสายโซ่เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ดังนั้นเมื่อปริมาณไดออกทิลพาทาเลตเพิ่มขึ้น ความสามารถรับแรงของชิ้นงานทดสอบจึงลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของชิ้นงานทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะไดออกทิลพาทาเลตช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการยืดตัว และความโค้งงอของชิ้นงานทดสอบ สำหรับรูปที่ 4.3(จ) พบว่าปริมาณไดออกทิลพาทาเลตไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ

จากผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าปริมาณไดออกทิลพาทาเลตที่เหมาะสม คือ 40 phr จะได้พีวีซีที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีไม่แข็งเปราะหรืออ่อนนุ่มเกินไป ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ในหัวข้อต่อไปจึงใช้ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr

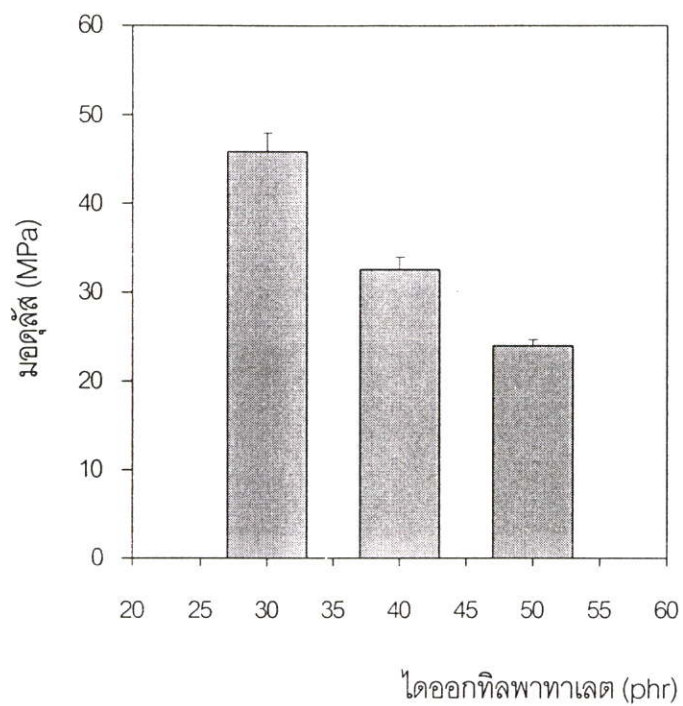


(ก) ความแข็งแรงดึง

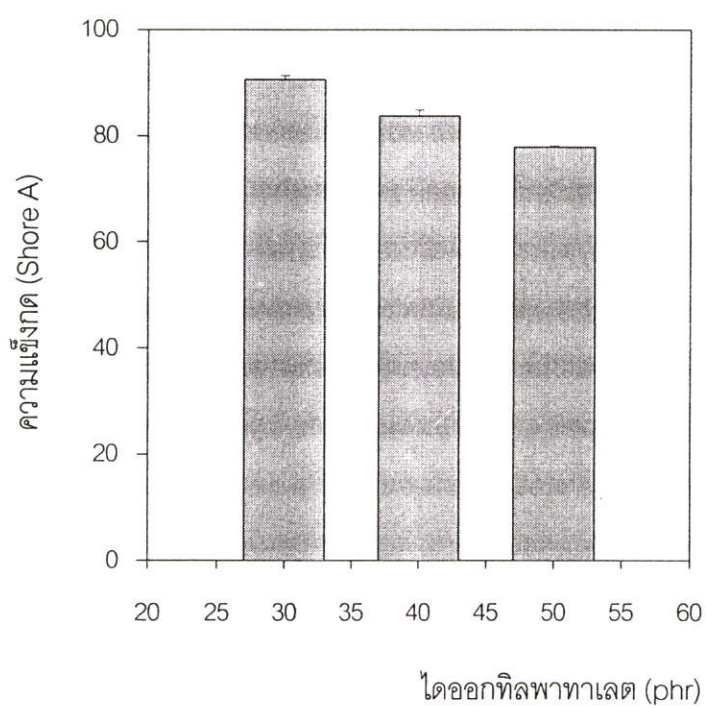


(ข) เปอร์เซ็นต์การยัด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณไดออกซิลพาทาเลต (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมเอซีไดคาร์โบนาไมด์และซิงค์ออกไซด์)

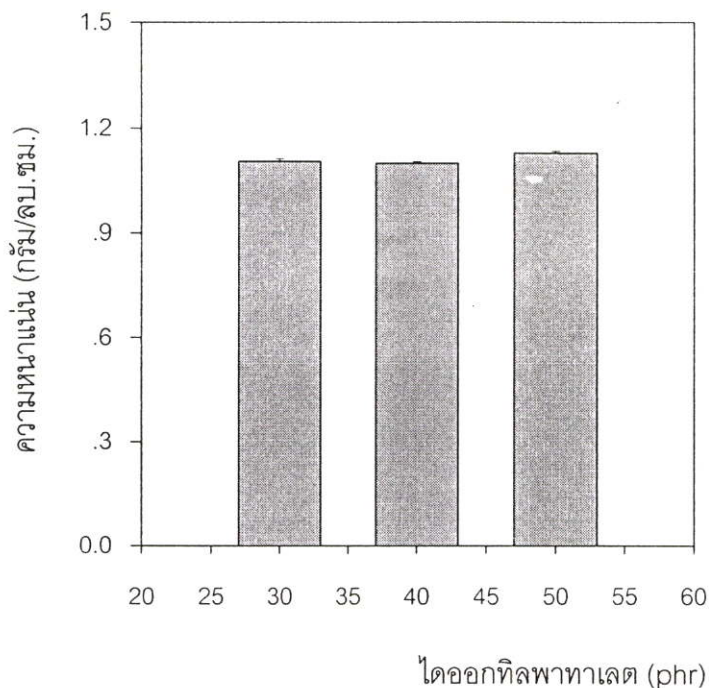


(ค) มอดุลัส



(ง) ความแข็งกด

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



(จ) ความหนาแน่น

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

4.1.4 ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์

อัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบสัมพันธ์โดยตรงกับขนาด ปริมาณ และความตึงของรูพรุนในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ การเติมเอโซไดคาร์โบนาไมด์ปริมาณที่เพียงพอทำให้ได้ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์มากพอที่จะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีรูพรุนที่มีความตึงและความหนาแน่นเพียงพอที่จะให้น้ำซึมผ่านได้ แต่การเติมเอโซไดคาร์โบนาไมด์มากเกินไปนอกจากจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายแล้วยังทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ จากส่วนผสมสูตรที่ 4 ในตารางที่ 3.2 โดยแปรผันปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ 2, 4, 6 และ 14 phr จะได้ความสัมพันธ์ของปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์กับความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งแรงดึง ความหนาแน่น และสัณฐานวิทยา เมื่อใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ดังรูปที่ 4.4(ก)–4.4(จ), 4.5(ก)–4.5(ง) และตารางที่ 4.2

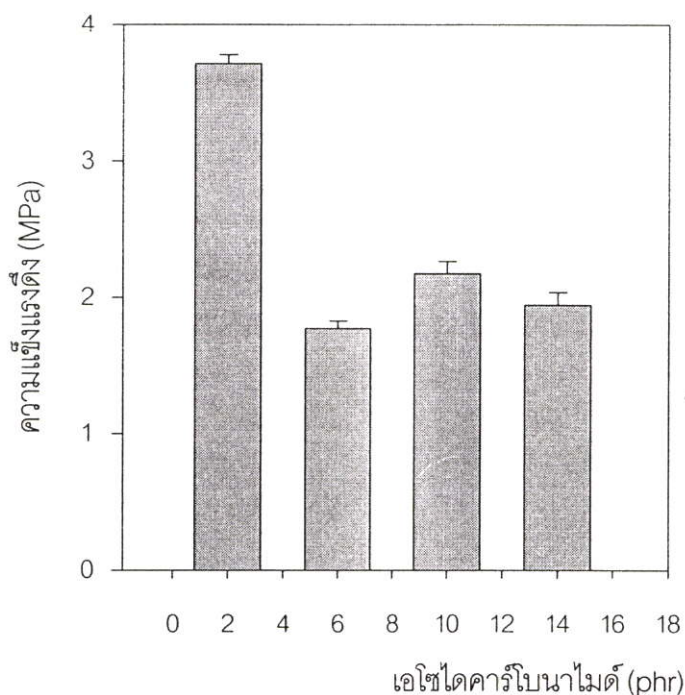
จากรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ค) เมื่อปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์เพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์จะเพิ่มขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดภายในชิ้นงานทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น มีปริมาณและความตึงของรูพรุนเพิ่มขึ้น นั่นคือเกิดความไม่ตึงในชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการแตกหักและเสียหายได้ง่าย (ทฤษฎีการแตกหักของกริฟฟิทใน

หัวข้อที่ 2.11) ทำให้ความสามารถในการรับแรงได้น้อยลง ดังนั้นเมื่อปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสจึงมีแนวโน้มลดลง

จากรูปที่ 4.4(ข) เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด ของชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ที่เพิ่มขึ้น ชิ้นงานทดสอบมีรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ในการยึดตัวในแนวแรงของชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น

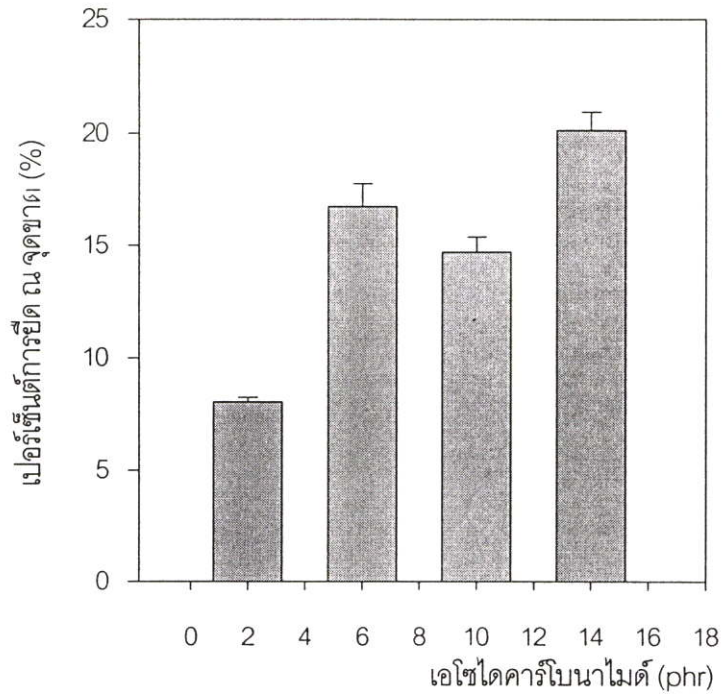
จากรูปที่ 4.4(ง) และ 4.4(จ) พบว่าเมื่อปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์เพิ่มขึ้น ความแข็งกด และความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลง เนื่องจากมีรูพรุนของก๊าซจากเอโซไดคาร์โบนาไมด์แทรกตัวในชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น

เมื่อทดสอบการซึมผ่านของน้ำซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของรูพรุนว่าเป็นแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด พบว่าน้ำสามารถซึมผ่านชิ้นงานทดสอบที่ใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr ได้ 0.03 ± 0.01 ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร ส่วนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์น้อยกว่า 14 phr น้ำไม่สามารถซึมผ่านชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านฐานวิทยาซึ่งจะกล่าวต่อไป

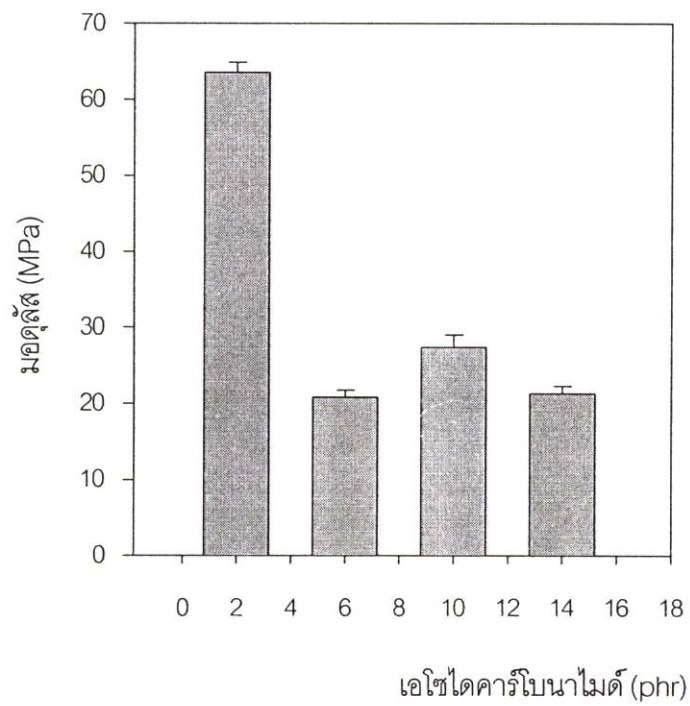


(ก) ความแข็งแรงดึง

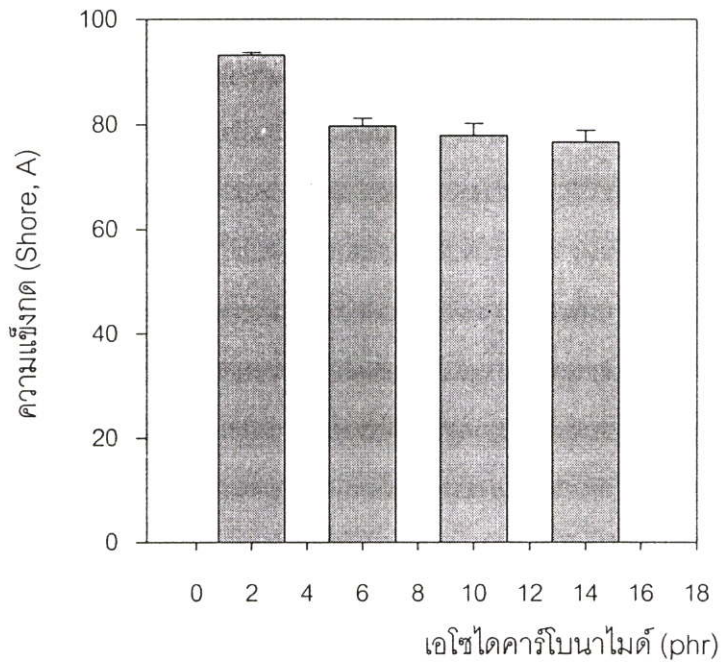
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (ไดออกซิลพาทาเลต 40 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์)



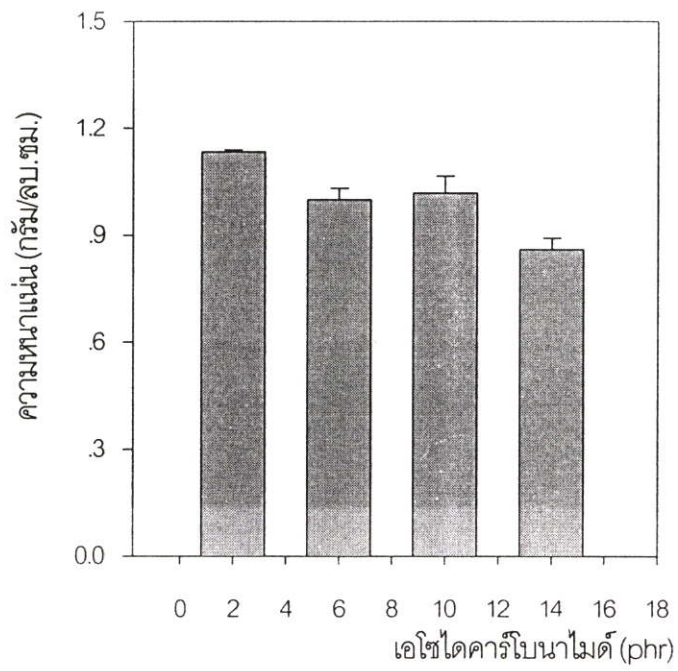
(ข) เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด



(ค) มอดุลัส



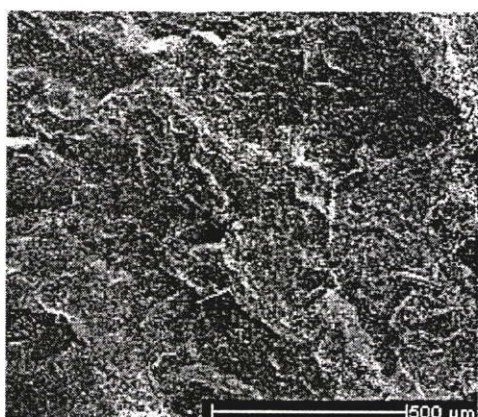
(ง) ความแข็งกต



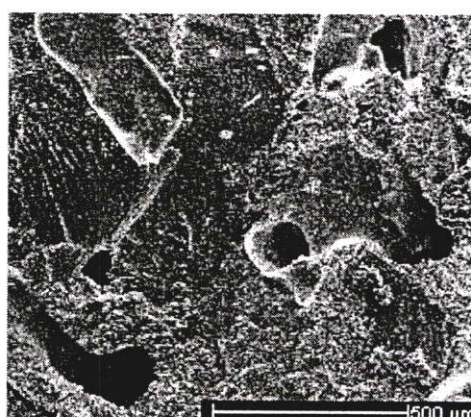
(จ) ความหนาแน่น

รูปที่ 4.4 (ต่อ)

รูปที่ 4.5(ก)-4.5(ง) SEM micrographs แสดงลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ 2, 6, 10 และ 14 phr ตามลำดับ ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ของรูพรุนจาก SEM micrographs โดยใช้โปรแกรม AutoCAD (ภาคผนวก ง) จากรูปที่ 4.5(ก)-4.5(ง) จะเห็นว่าชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ 2 phr มีรูพรุนน้อยมาก ดังนั้นจึงหาพื้นที่รูพรุนเฉพาะของชิ้นงานทดสอบที่ใช้เอโซโดคาร์โบนาไมด์ 6, 10 และ 14 phr แม้ว่าจาก SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ 6 และ 10 phr จะเห็นรูพรุน แต่เมื่อทดสอบการซึมผ่านของน้ำเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ 14 phr พบว่าน้ำไม่สามารถซึมผ่านชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์น้อยกว่า 14 phr ได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แสดงว่ารูพรุนในชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ 6 และ 10 phr เป็นรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน และจากค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่นในรูปที่ 4.4(ก)-4.4(จ) ที่ได้แสดงมาแล้ว สรุปได้ว่าปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม คือ 14 phr

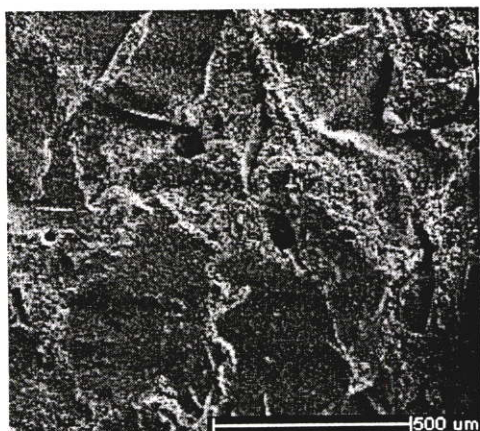


(ก) 2 phr

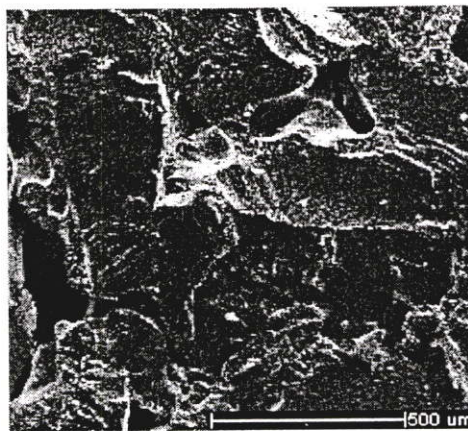


(ข) 6 phr

รูปที่ 4.5 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่ปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ต่าง ๆ (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์)



(ค) 10 phr



(ง) 14 phr

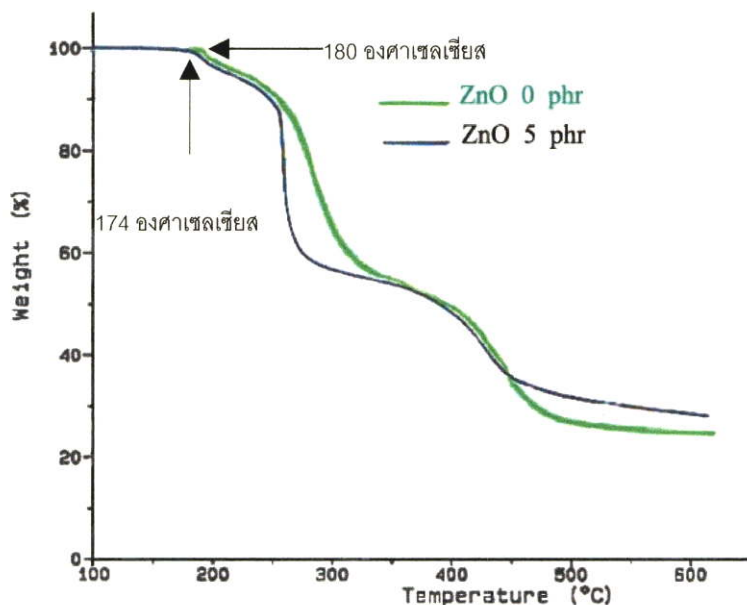
รูปที่ 4.5 (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบกับปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ พื้นที่ชิ้นงานทดสอบ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD)

ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (phr)	พื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบ (ตารางไมโครเมตร)
6	1,400-16,000
10	13,000-23,000
14	2,000-35,000

4.1.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีและผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่ช่วยให้เอโซไดคาร์โบนาไมด์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง จากการวิเคราะห์การสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ในพีวีซีคอมปานด์ที่เติมซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง DTA [13] พบว่าอุณหภูมิที่เอโซไดคาร์โบนาไมด์สลายตัวลดลงได้มาก (จาก 238 องศาเซลเซียส เป็น 218 องศาเซลเซียส) โดยใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์น้อยที่สุด คือ 5 phr และเมื่อนำพีวีซีคอมปานด์ที่เตรียมจากสูตรที่ 5 ในตารางที่ 3.2 มาทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA (ดังรูปที่ 4.6) และ DSC (ภาคผนวก ข รูปที่ ข-2) พบว่าเอโซไดคาร์โบนาไมด์ในพีวีซีคอมปานด์ที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวสูงสุดที่ 186 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ข รูปที่ ข-1) ส่วนการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ใน

พีวีซีคอมปานด์ที่เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 174 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวสูงสุดที่ 184 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ข รูป ข-2)



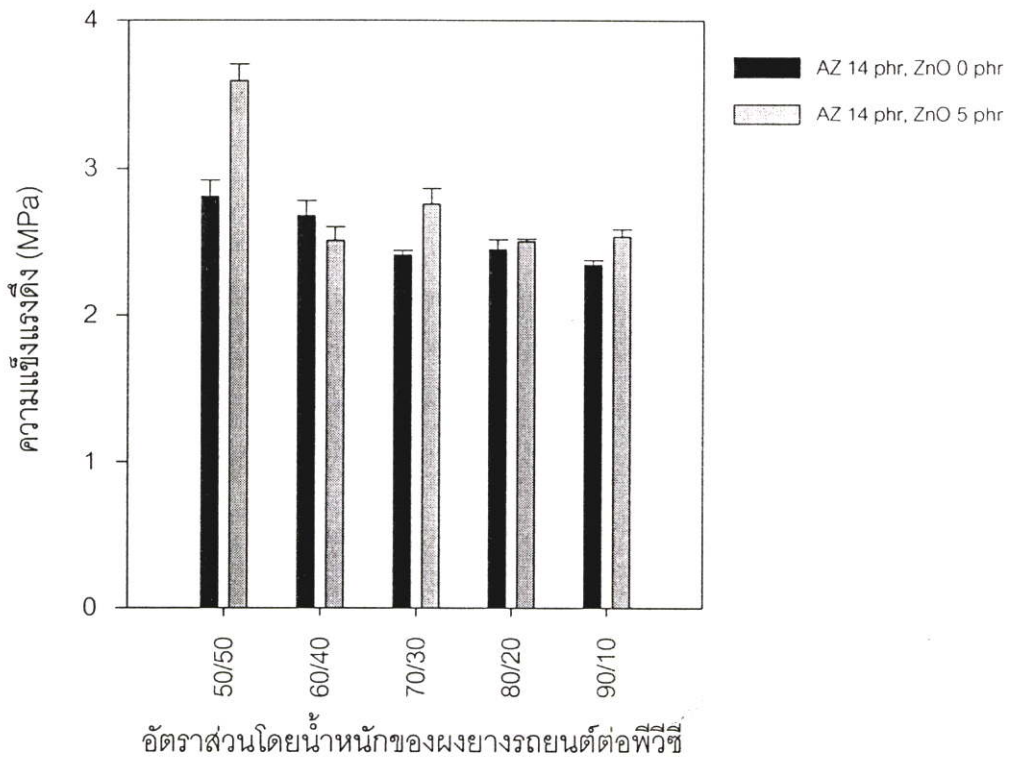
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์การสลายตัวของเอโซไดคาร์บอนาไมด์ด้วย TGA (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซไดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40)

เนื่องจากการเข้ากันได้ระหว่างผงยางรถยนต์กับพีวีซีมีช่วงกว้างตั้งแต่ 0/100,..., 90/10 ดังนั้นเพื่อต้องการเติมผงยางรถยนต์ในสัดส่วนที่มากที่สุด โดยต้องไม่เกิดผลเสียต่อสมบัติของท่อน้ำซึมที่ต้องการขึ้นรูป จึงศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพีวีซีดังนี้ 50/50, 60/40, 70/30, 80/20 และ 90/10 จากรูปที่ 4.7(ก) และ 4.7(ง) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และความแข็งกดของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้จากสูตรที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ และเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr มีค่าลดลง เพราะการที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้น พีวีซีซึ่งเป็นวัสดุที่ต่อเนื่องและทำหน้าที่เป็นสารยึดมีปริมาณน้อยลง อีกทั้งยังมีช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดจากการแทรกตัวของก๊าซซึ่งเป็นแบบเซลล์เปิดและเซลล์ปิด ทำให้ความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น ชิ้นงานทดสอบจึงมีความสามารถในการรับแรงได้น้อยลง นอกจากนี้ผงยางรถยนต์ยังมีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์จึงมีความยืดหยุ่นสูง ส่วนพีวีซีมีสมบัติเป็นพลาสติกจึงมีความแข็งมากกว่า ดังนั้นเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงลดลง

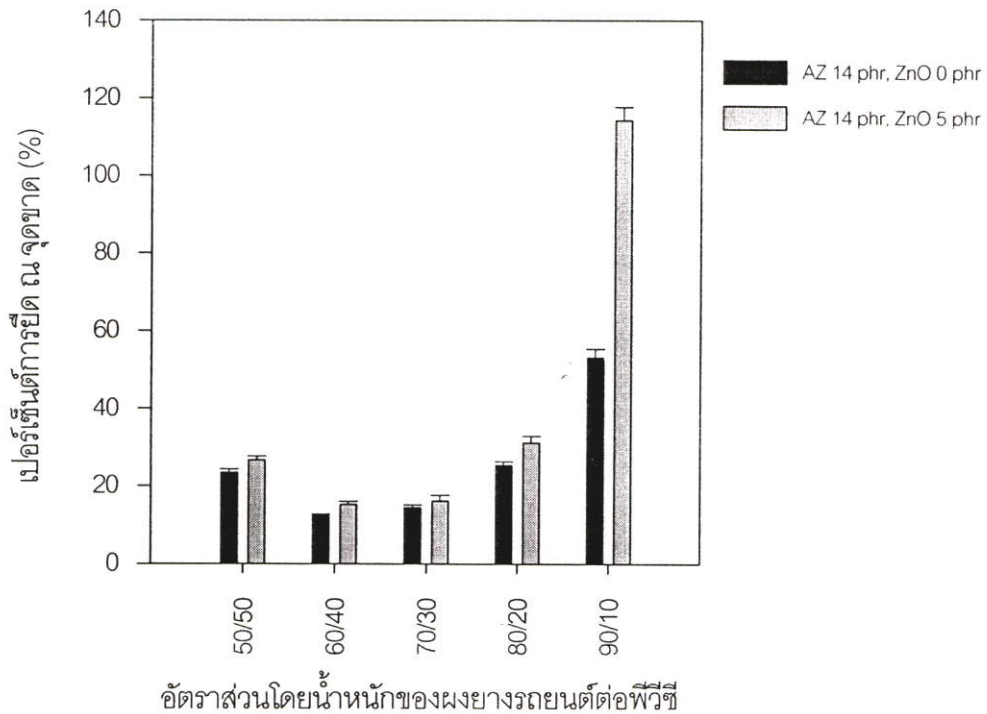
จากรูปที่ 4.7(ข) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 เป็น 60/40 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากสูตรที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ และเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr มีค่าลดลง เนื่องจากการเติมผงยางรถยนต์ลงในพีวีซีจะทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดความไม่ต่อเนื่อง ทำให้สมบัติการยืดตัวลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมผงยางรถยนต์ปริมาณมากลงในพีวีซี จะทำให้ผงยางรถยนต์เมื่อได้รับแรงกดอัดจากการขึ้นรูปจะรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.7(ค) สำหรับชิ้นงานทดสอบที่เตรียมโดยไม่เติมซิงค์ออกไซด์ เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 โมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 ค่าโมดูลัสจะลดลง ส่วนโมดูลัสของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมโดยเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr นั้น เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 70/30 ค่าโมดูลัสจะลดลง จากทั้งสองกรณีการที่ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงยางรถยนต์ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์มีค่าโมดูลัสต่ำกว่าพีวีซี

จากรูปที่ 4.7(จ) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นมีผลน้อยมากต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมโดยไม่เติมและเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณพีวีซีมีน้อยลงทำให้พื้นที่ที่ก๊าซซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์แทรกได้น้อยลง

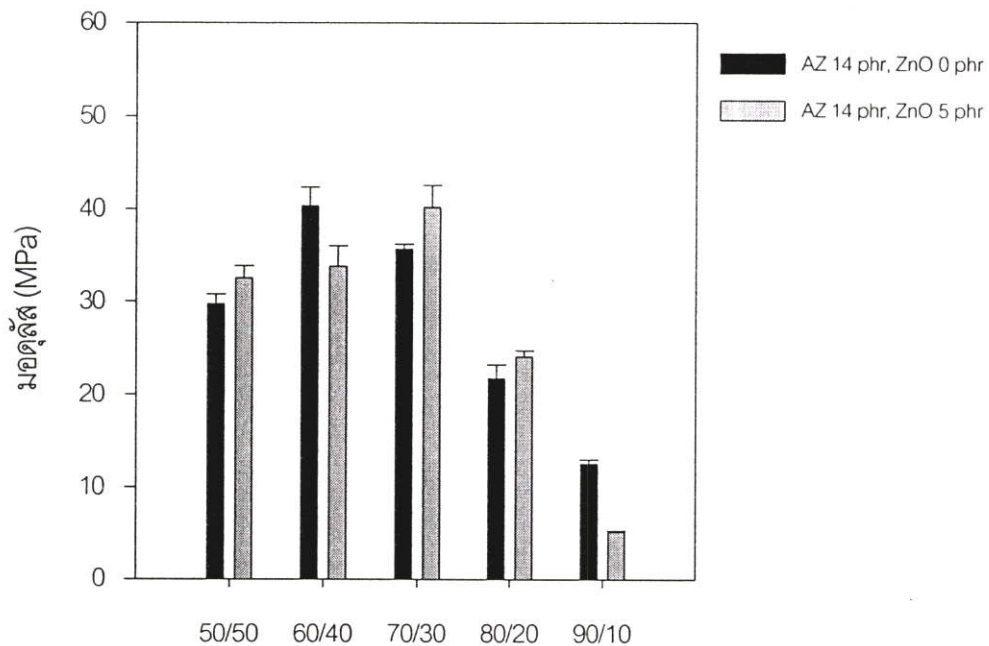


(ก) ความแข็งแรงดึง



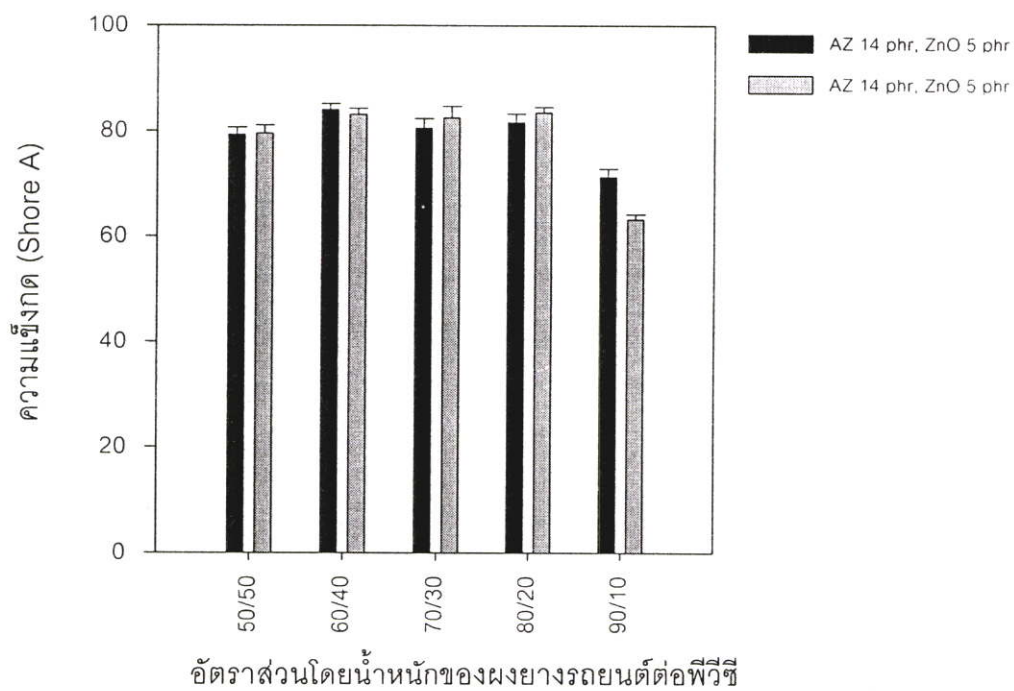
(ข) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีที่มีการเติมและไม่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ (ไดออกซิลพาทาเลต 40 phr เอโซไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr)



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี

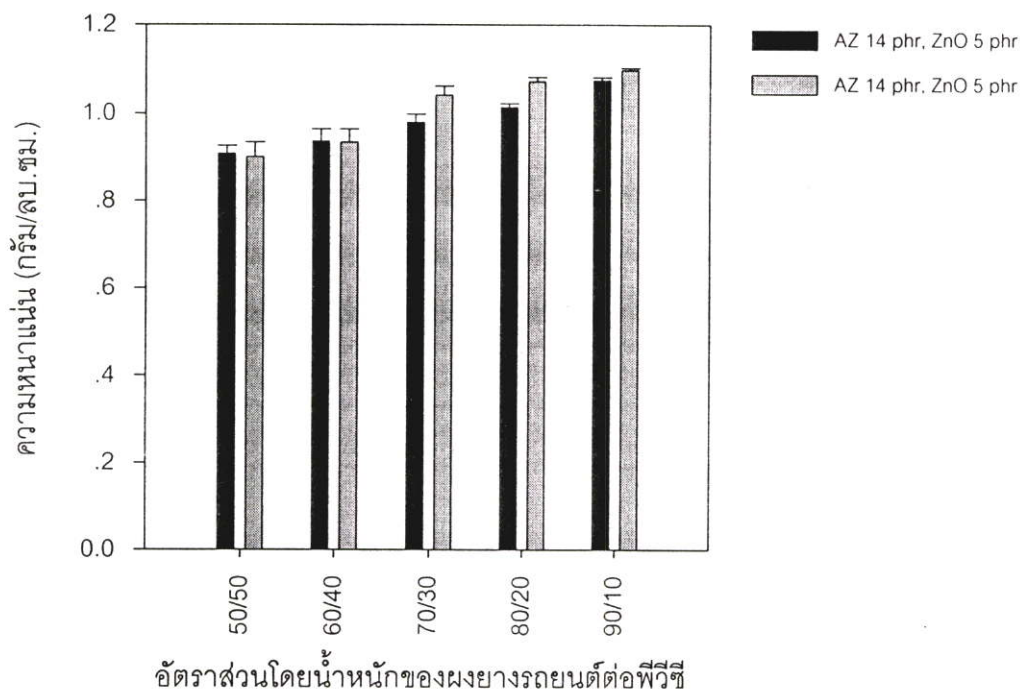
(ค) มอดุลัส



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี

(ง) ความแข็งกด

รูปที่ 4.7 (ต่อ)



(จ) ความหนาแน่น

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

จากการตรวจสอบการซึมผ่านของน้ำที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40,...,90/10 ของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมและเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพีวีซีมากกว่า 60/40 น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 มีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากที่สุด ดังนั้นการรายงานผลการศึกษาการซึมผ่านของน้ำจะรายงานเฉพาะชิ้นงานทดสอบที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ คือ ชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50 และ 60/40 ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50 และ 60/40 มีค่าเท่ากับ 0.09 ± 0.02 และ 0.16 ± 0.02 ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนอัตราซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50 และ 60/40 มีค่าเท่ากับ 0.06 ± 0.02 และ 0.07 ± 0.01 ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สรุปว่าสำหรับทั้งสองอัตราส่วนการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์มีค่ามากกว่าชิ้นงานทดสอบที่เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดย น้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr)

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของผงยางรถยนต์ต่อ พีวีซี	อัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงาน ทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ (ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร)	อัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงาน ทดสอบที่เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr (ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร)
50/50	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.02
60/40	0.16 ± 0.02	0.07 ± 0.01

รูปที่ 4.8(ก)-4.8(ง) SEM micrographs แสดงลักษณะวิทยาของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ อัตราส่วนโดย น้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ตามลำดับ จากรูปแสดง ให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 เป็น 60/40 ปริมาณรูพรุนจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 ปริมาณรูพรุนลดลง ขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อ พีวีซีเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม AutoCAD (ภาคผนวก ง) คำนวณหาพื้นที่จาก SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40 และ 70/30 พบว่าพื้นที่ ของรูพรุนของชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40 และ 70/30 มีค่าเท่ากับ 900-31,000, 2,000-35,000 และ 600-1,200 ตารางไมโครเมตร ตามลำดับ ต่อพื้นที่ของชิ้นงานทดสอบ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของน้ำร่วมกับสมบัติลักษณะวิทยา และการตรวจสอบพื้นที่ของชิ้นงานทดสอบ พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อ พีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 เป็น 60/40 ชิ้นงานทดสอบมีรูพรุนขนาดเล็กลงแต่มีอัตราการซึมผ่านของ น้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ารูพรุนในชิ้นงานทดสอบมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 60/40 เป็น 70/30 ปริมาณ ขนาด และความต่อเนื่องของ รูพรุนจะลดลง

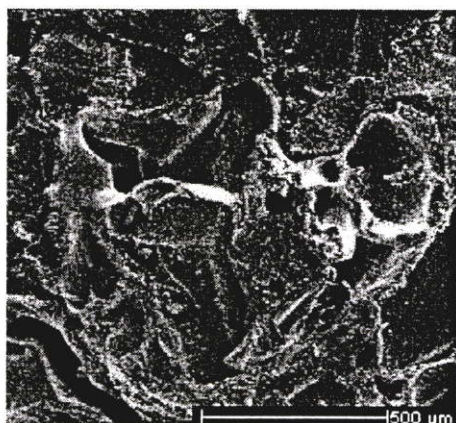
รูปที่ 4.9(ก)-4.9(ง) SEM micrographs แสดงลักษณะวิทยาของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr และซิงค์ออกไซด์ 5 phr ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 จากรูปแสดงให้เห็นว่า

เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 เป็น 60/40 ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 ปริมาณรูพรุนลดลง ขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับผลสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์

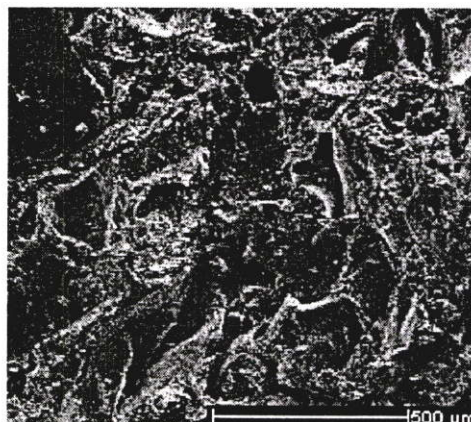
จากตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม AutoCAD คำนวณหาพื้นที่จาก SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่เติมซิงค์ออกไซด์ พบว่าพื้นที่ของรูพรุนของชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 50/50, 60/40 และ 70/30 มีค่าเท่ากับ 1,100-68,000, 1,600-51,000 และ 2,600-8,000 ตารางไมโครเมตร ตามลำดับ ต่อพื้นที่ของชิ้นงานทดสอบ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของน้ำร่วมกับสมบัติสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบที่เติมซิงค์ออกไซด์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 50/50 เป็น 60/40 ชิ้นงานทดสอบมีรูพรุนขนาดเล็กลงแต่มีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีเพิ่มขึ้นจาก 60/40 เป็น 70/30 ปริมาณ ขนาด และ ความต่อเนื่องของรูพรุนจะลดลงเช่นเดียวกับผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมซิงค์ออกไซด์

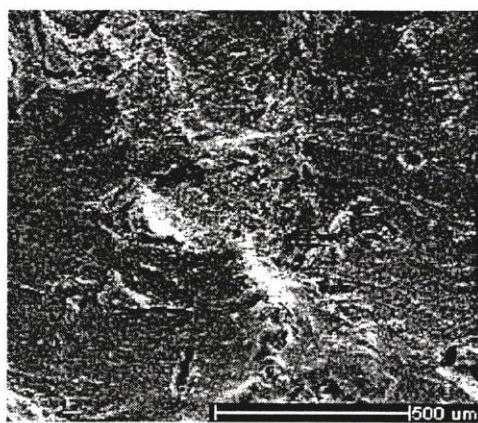
จากผลการทดสอบความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และสมบัติการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากสูตรที่ไม่เติม และเติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากพีวีซีคอมเปานด์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบใช้เกลือตะกั่วเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และตะกั่วมีสมบัติเป็นสารกระตุ้นซึ่งสามารถช่วยให้เอโซโดคาร์บอนาไมด์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลงเช่นเดียวกับซิงค์ออกไซด์ สรุปได้ว่าไม่จำเป็นต้องเติมซิงค์ออกไซด์ในสูตรที่ใช้ขึ้นรูปท่อน้ำดื่ม



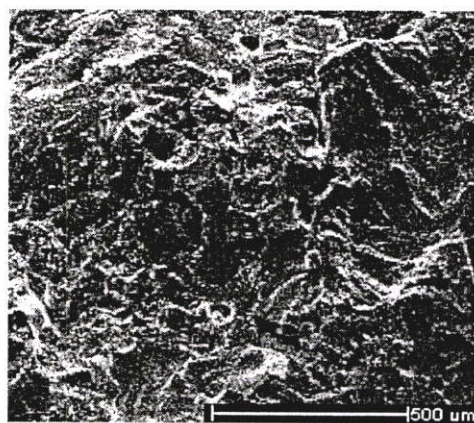
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.8 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีต่าง ๆ ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ (ไดออกซิลพาทาเลต 40 phr เอโซไดคาร์บอนาไมด์ 14 phr)

(ก) 50/50

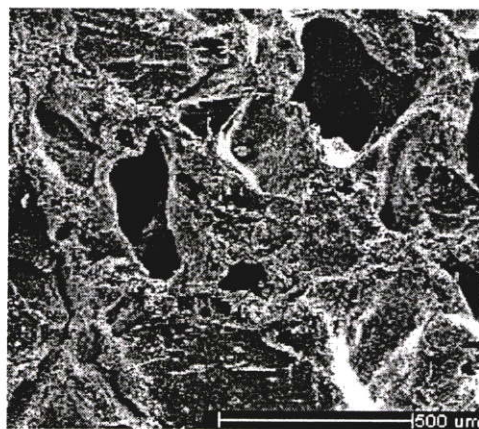
(ข) 60/40

(ค) 70/30

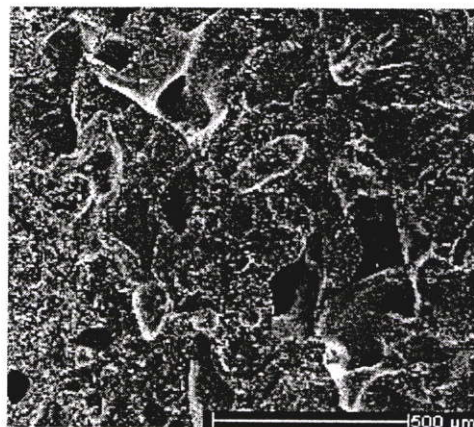
(ง) 80/20

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูปทรงของชิ้นงานทดสอบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr พื้นที่ชิ้นงานทดสอบ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD)

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของผงยางรถยนต์ต่อ พีวีซี	พื้นที่ของรูปทรงของชิ้นงานทดสอบ (ตารางไมโครเมตร)	
	ไม่เติมซิงค์ออกไซด์	เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr
50/50	900-31,000	1,100-68,000
60/40	2,000-35,000	1,600-51,000
70/30	600-1,200	2,600-8,000

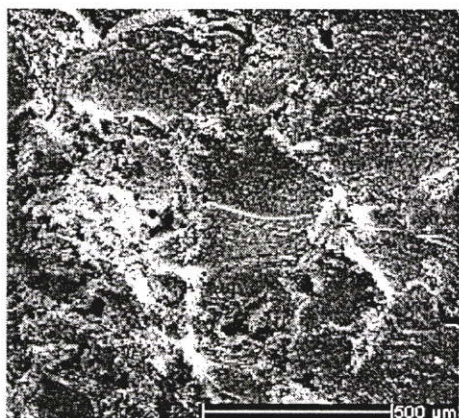


(ก) 50/50



(ข) 60/40

รูปที่ 4.9 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีต่าง ๆ เติมซิงค์ออกไซด์ 5 phr (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr)



(ค) 70/30



(ง) 80/20

รูปที่ 4.9 (ต่อ)

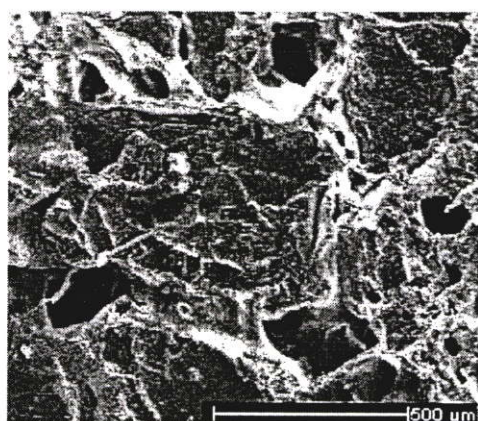
4.1.6 ขนาดผยงรยณนต

จากตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผยงรยณนตต่อพีวีซี 60/40 เมื่อใช้ผยงรยณนตขนาด 10 เมช (1.6 มิลลิเมตร) 20 เมช (0.8 มิลลิเมตร) และ 30 เมช (0.4 มิลลิเมตร) พบว่าชิ้นงานทดสอบมีอัตราการซึมผ่านของน้ำ 0.20 ± 0.07 , 1.59 ± 0.06 และ 0.16 ± 0.02 ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงผลในรูปค่าเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดลอง คือ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีค่าน้อยแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวน้อย แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีค่ามากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมาก พบว่าชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผยงรยณนตขนาด 10, 20 และ 30 เมช มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเท่ากับ 0.99, 0.11 และ 0.37 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการซึมผ่านของน้ำเป็นตัวบ่งบอกถึงความต่อเนื่องของรูพรุนในชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าชิ้นงานทดสอบที่ใช้ผยงรยณนตขนาด 20 เมช มีรูพรุนต่อเนื่องและเป็นเซลล์แบบเปิดและมีการกระจายตัวของรูพรุนดีที่สุด

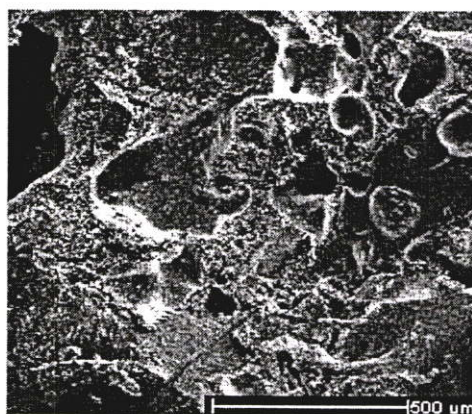
รูปที่ 4.10(ก)-4.10(ค) SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ผยงรยณนตขนาด 10, 20 และ 30 เมช

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบกับขนาดผงยางรถยนต์ (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์)

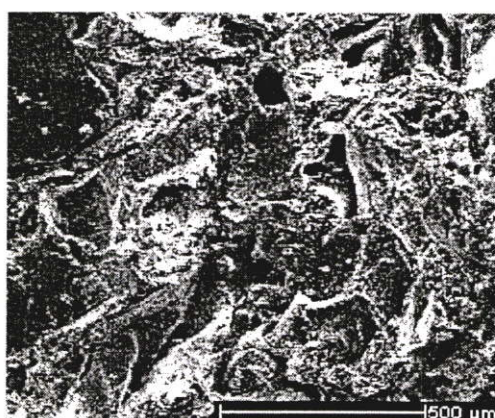
ขนาดผงยางรถยนต์ (เมช)	อัตราการซึมผ่านของน้ำ (ลิตร/ชั่วโมง-ตารางเซนติเมตร)	สัมประสิทธิ์การ กระจาย
10	0.20 ± 0.07	0.99
20	1.59 ± 0.06	0.11
30	0.16 ± 0.02	0.37



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 SEM micrographs ของชิ้นงานทดสอบที่ขนาดผงยางรถยนต์ต่าง ๆ (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์)

(ก) 10 เมช

(ข) 20 เมช

(ค) 30 เมช

จากรูปพบว่าขนาดของรูพรุนของชั้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาดเล็กที่สุดคือ 30 เมช มีค่าเล็กกว่าขนาดของรูพรุนของชั้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช แสดงว่าผงยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะให้รูพรุนขนาดใหญ่

จากการวิเคราะห์พื้นที่รูพรุนของชั้นงานทดสอบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พื้นที่รูพรุนของชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช และ 20 เมช มีค่าเท่ากับ 850-74,000 และ 17,000-52,000 ตารางไมโครเมตร ต่อพื้นที่ของชั้นงานทดสอบ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร ตามลำดับ แต่จากตารางที่ 4.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านรูพรุนของชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่ามากกว่าของชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช แสดงว่าชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีความต่อเนื่องของรูพรุนมากกว่าชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช

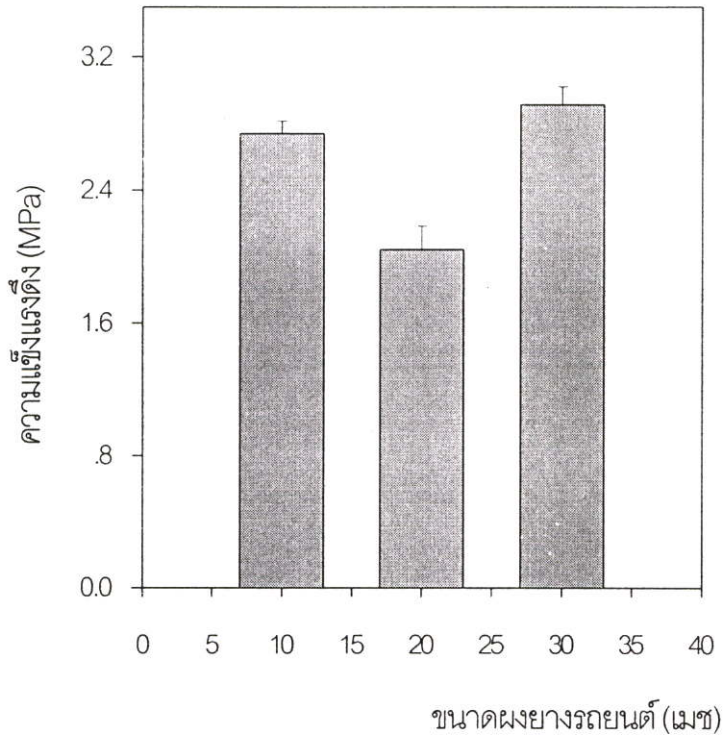
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่รูพรุนของชั้นงานทดสอบกับขนาดผงยางรถยนต์

(ไดออกซิลพาทาเลส 40 phr เอซีไดคาร์บอไมด์ 14 phr ไมเดมิซิงค์ออกไซด์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ชั้นงานทดสอบมีพื้นที่ 7.3×10^6 ตารางไมโครเมตร วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD)

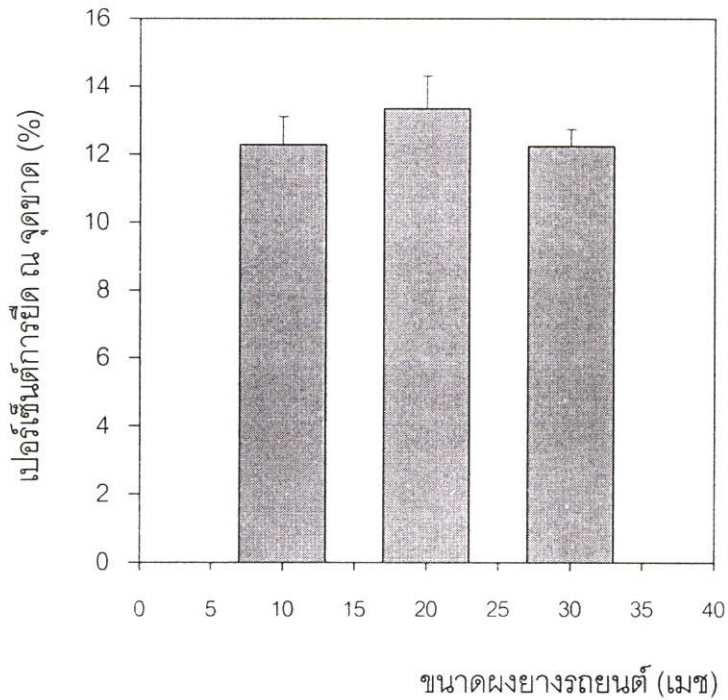
ขนาดผงยางรถยนต์ (เมช)	พื้นที่รูพรุนของชั้นงานทดสอบ (ตารางไมโครเมตร)
10	850-74,000
20	17,000-52,000
30	2,000-35,000

รูปที่ 4.11(ก)-4.11(ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผงยางรถยนต์กับความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น พบว่าขนาดผงยางรถยนต์มีผลน้อยมากต่อเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งกด และความหนาแน่น

แม้ว่าค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช จะมีค่าน้อยกว่าค่าของชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช แต่ค่าทั้งสองเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานสำหรับท่อน้ำซึม และดังได้กล่าวแล้วว่าการซึมผ่านของน้ำสำหรับชั้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่าสูงที่สุด จึงสรุปได้ว่าขนาดผงยางรถยนต์ที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ 20 เมช

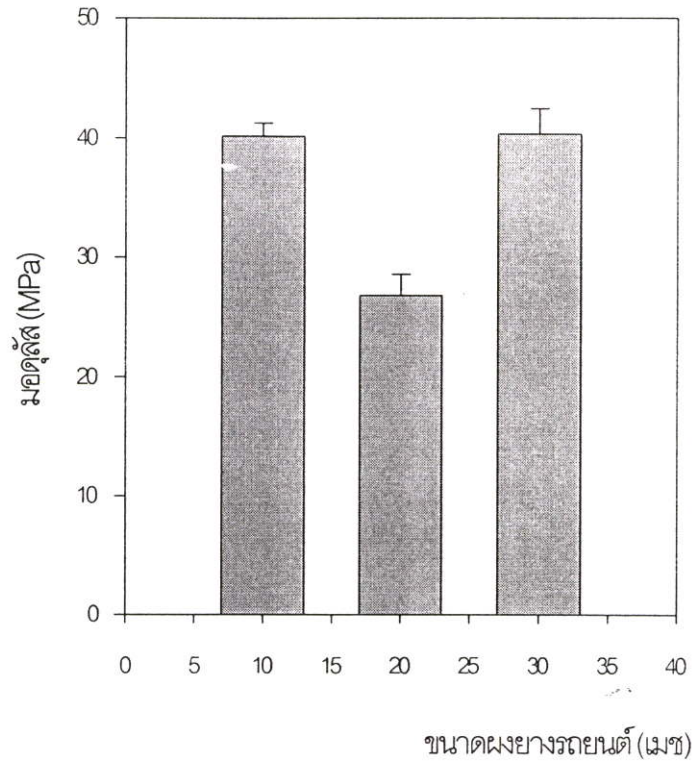


(ก) ความแข็งแรงดึง

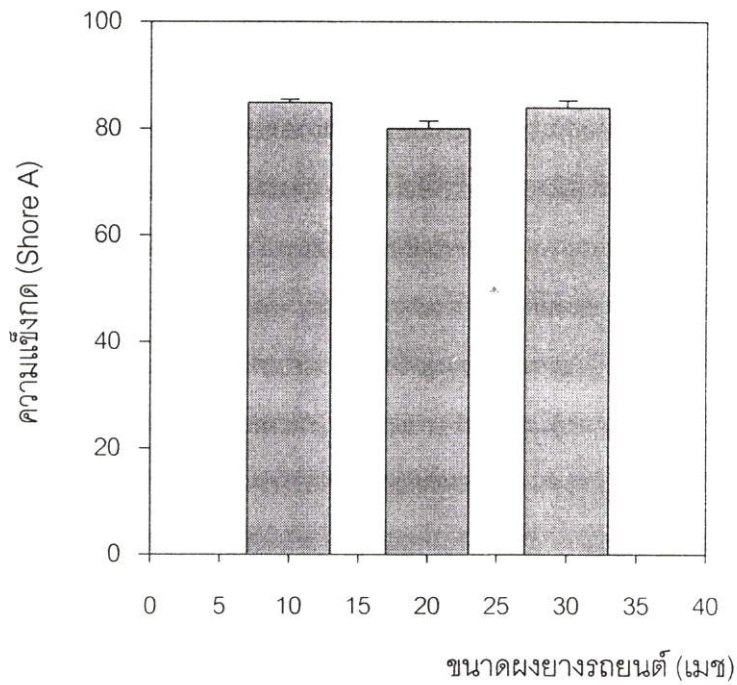


(ข) เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด

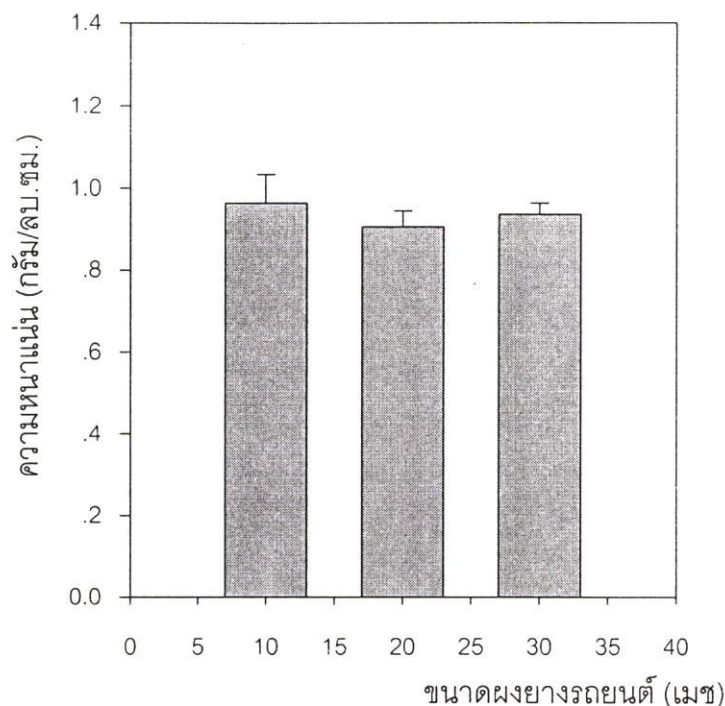
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบกับขนาดผงยางรถยนต์ (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซโดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์กับฟิวซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์)



(ค) มอดุลัส



(ง) ความแข็งกต



(จ) ความหนาแน่น

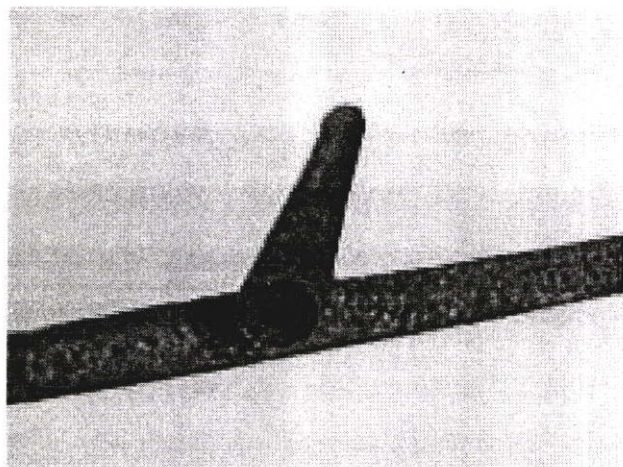
รูปที่ 4.1 (ต่อ)

4.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึมและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม

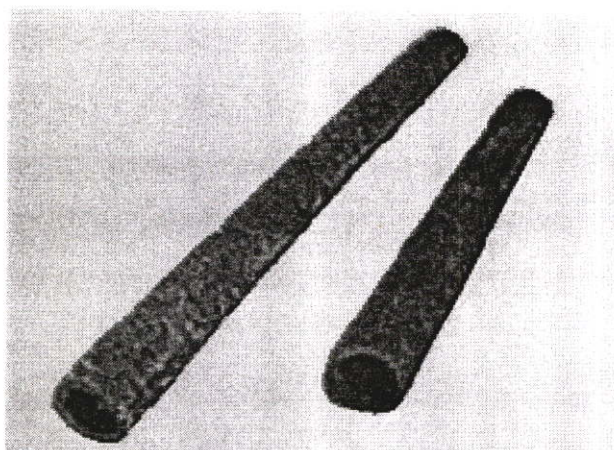
จากผลการทดลองในส่วนแรก องค์ประกอบของวัตถุดิบที่เหมาะสมเพื่อใช้ขึ้นรูปท่อน้ำซึม โดยเทคนิคการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนเดี่ยว คือ ปริมาณไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี คือ 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ และผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช โดยใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปไซน 1 ถึง 4 คือ 180, 200, 210 และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรู 15 รอบ/นาที ท่อน้ำซึมที่ขึ้นรูปได้มีลักษณะเป็นท่อน้ำดำ ผิวขรุขระ กลิ่นคล้ายยางรถยนต์ที่ผลิตใหม่ มีความหนาประมาณ 0.35 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 2 เซนติเมตร (ดังรูปที่ 4.12) และสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และสมบัติการซึมผ่านของน้ำ เท่ากับ 1.13 ± 0.04 MPa, $21.85 \pm 0.95\%$, 10.41 ± 0.54 MPa, 76 ± 2 (Shore A), 0.78 ± 0.04 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร, 8.95 ± 0.99 ลิตร/ชั่วโมง-เมตร ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.7)

ความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่จำหน่ายในต่างประเทศของบริษัท Micro-flo Industries จำกัด ซึ่งผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ต่อพอลิเมออร์และโคพอลิเมออร์ (ไม่ระบุชนิด) อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 80/20 มีค่าเท่ากับ 4.14 MPa [47] เมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมจากงานวิจัยนี้ พบว่า

ท่อน้ำซึมจากงานวิจัยนี้มีความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่า จึงควรพิจารณานำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงนัก สำหรับอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน และอยู่ในเกณฑ์สามารถนำไปพัฒนาผลิตเป็นท่อน้ำซึมเพื่อให้น้ำแบบหยดในงานเกษตรกรรมได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ท่อน้ำซึม (ไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซไดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วน
โดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ ผงยางรถยนต์
ขนาด 20 เมช)

(ก) รูปหน้าตัดของท่อน้ำซึม

(ข) รูปท่อน้ำซึมตามแนวยาว

ตารางที่ 4.7 สมบัติท่อน้ำซึมที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.13 ± 0.04
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	21.85 ± 0.95
มอดุลัส (MPa)	10.41 ± 0.54
ความแข็งกด (Shore A)	76 ± 2
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.78 ± 0.04
อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันน้ำ 5×10 ⁻³ MPa (ลิตร/ชั่วโมง-เมตร)*	8.95 ± 0.99

หมายเหตุ *อัตราการซึมผ่านของน้ำของการให้น้ำแบบหยดที่ใช้โดยทั่วไป คือ 1-20 ลิตร/ชั่วโมง [25]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

จากการศึกษาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิไวนิลคลอไรด์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 แบบจำลองท่อน้ำซึม

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของพีวีซี และ ช่วงอุณหภูมิที่เอโซไดคาร์โบนาไมด์เกิดปฏิกิริยาละลายตัว โดยอุณหภูมิเหมาะสมสำหรับขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด คือ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที

2. ปริมาณไดออกซิลพาทาเลตในพีวีซีแปรผกผันกับความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงกด แต่แปรผันโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมีผลน้อยมากต่อความหนาแน่น

3. ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ที่เพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดรูพรุนที่เป็นแบบเซลล์เปิด คือ 14 phr เมื่อปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์เพิ่มขึ้นในช่วง 2 ถึง 14 phr ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งแรงกด และความหนาแน่นจะมีค่าลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น

4. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิดในชิ้นงานทดสอบ จากการศึกษพบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีมากกว่า 60/40 น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ดังนั้นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซีที่เหมาะสม คือ 60/40 (ปริมาณผงยางรถยนต์มากที่สุด โดยไม่กระทบต่อสมบัติของท่อน้ำซึม)

5. สมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เติมและเติมซิงค์ออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่จำเป็นต้องเติมซิงค์ออกไซด์ในสูตรเพื่อขึ้นรูปท่อน้ำซึม

6. ชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 10 เมช แต่ค่าทั้งสองเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานสำหรับท่อน้ำซึม ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำสำหรับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีปริมาณรูพรุนมากและรูพรุนส่วนใหญ่เป็นเซลล์แบบเปิด

5.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม

จากสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาในช่วงแรก สามารถใช้ในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีด ได้ท่อน้ำซึมที่มี ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันน้ำ 5×10^{-3} MPa เท่ากับ 1.13 MPa, 21.85%, 10.41 MPa, 76 (Shore A), 0.78 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 8.95 ลิตร/ชั่วโมง-เมตร ตามลำดับ

5.3 ข้อเสนอแนะ

เรื่องที่จะศึกษาต่อ คือ

5.3.1 สภาวะในการขึ้นรูปท่อน้ำซึม ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู และชนิดของสกรูต่อสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

5.3.2 ปรับปรุงหัวฉีดท่อให้มีการไหลออกของพอลิเมอร์ดีขึ้น และใช้เป็นน้ำสารหล่อเย็นแทนอากาศ รวมทั้งสร้างอุปกรณ์ปรับขนาดท่อและดึงท่อ เนื่องจากมีผลต่อความหนาของท่อน้ำซึมซึ่งกระทบต่อสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

5.3.3 ผลของความดันของน้ำต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึม

5.3.4 ผลของชนิดของสารให้ฟองชนิดอื่น ๆ เช่น Modified azodicarbonamide, 4,4'-Oxybis(benzenesulfohydrazide) ฯลฯ ต่อสมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของน้ำ สันฐานวิทยา และต้นทุนในการผลิตท่อน้ำซึม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Samosorn S., Editor. "Thai autos exports rise over 60% in quarter 1st Ed. The Rubber, vol. 3, no. 29, 2001. pp. 21-22.
- [2] กระทรวงคมนาคม. "สถิติ." [Online] : <http://www.motc.go.th/stats3.htm>. 2544.
- [3] Evans A.S. "Waste tyres can be replacement fuel for coal." RubberAsia, 1999. pp. 139-140.
- [4] Klingensmith W., Baranwal K. "Recycling of rubber: An overview." Rubber World, vol. 218, no. 3, June 1998. pp. 41-46.
- [5] Makarov V.M., Drozdovski V.F., Reprocessing of tyres and rubber wastes recycling from the rubber products industry. Ellis Horwood. 1991.
- [6] John S. Polymer Recycling : Science, Technology and Application. Chichester : John Wiley & Sons. 1998.
- [7] มนตรี คำชู. หลักการชลประทานแบบหยด : การออกแบบและการแก้ปัญหา. กรุงเทพฯ: เค.ยู. บุ๊คเซ็นเตอร์. 2537.
- [8] Leaky pipe system Ltd. "See Leaky Pipe Porous Hose Working.htm." [Online] : <http://www.leakypipe.com>. 2544.
- [9] เบญจวรรณ ชนะจัญญวิทย์ พรวิ สุมิตร และอมรวดี ยูวโกศล. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ." โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [10] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ. "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ." โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [11] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงยางรถยนต์." วิทยาสตรมหาบัณฑิต เคมีประยุกต์ (เทคโนโลยีพอลิเมอร์) บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [12] Pfenning J.L., Ross M. "Technique helps formulate cellular PVC." Plastics compounding, vol. 14 no. 3, May/June 1991. pp. 89-94.
- [13] Gächter R., Müller H., Editors. Plastics Additives Handbook. 4 th Ed. Cincinnati : Hanser/Gardner Publications, Inc. 1993.

- [14] Nass L.I., Heiberger C.A. Editors. *Encyclopedia of PVC Volume 2 : Compounding Design and Additives*. New York : Marcel Dekker, Inc. 1988.
- [15] Titow W.V. *PVC Plastics : Properties, Processing, and Applications*. London : The University Press (Belfast) Ltd. 1990.
- [16] Burgoyne M.D., Leaker G.R. and Krekic Z. " The Effect of Reusing Ground Flash and Scrap Rubber in Parent Compound." *Rubber Chemistry and Technology*, vol.49, no.49, 1976. pp. 375-378.
- [17] Accetta A., Vergnaud J.M. "Rubber Recycling-Upgrading of Scrap Rubber Powder by Vulcanization. II." *Rubber Chemistry and Technology*, vol.55, no.4, 1982. pp. 961-966.
- [18] Rajalingam P., Baker W. E. "The Role of Functional Polymers in Ground Rubber Tire-Polyethylene Composite." *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 65, May 1992. pp. 908-916.
- [19] Rajalingam P., Sharpe J. and Baker W. E. "Ground Rubber Tire/Thermoplastic Composites: Effect of Different Ground Rubber Tires." *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 66, 1995. pp. 664-677.
- [20] Pramanik P. K., Baker W. E. "Toughening of ground rubber tire filled thermoplastic compounds using different compatibilizer systems." *Plastics, Rubber and Composites Processing and Application*, vol. 24, no. 4, 1995. pp. 229-237.
- [21] Choudhury N. R., Bhattacharya S.N. "Effect of compatibilisation on mechanical and rheological properties of ground rubber tyre-polyethylene blends." *Plastics Rubber and Composites Processing and Applications*, vol. 25 no. 9, 1996. pp. 448-457.
- [22] Sawant A. B., Kale D. D. "Recycled rubber filled polyethylene." *Popular Plastics and Packaging*, September 1996. pp. 77-80.
- [23] Kowalska E., Wielgosz Z. "Scrap Rubber Reused-A New Process Produces Porous Pipes from Worn-out Tyres." *Polymer Recycling*, vol. 2, no. 3, 1996. pp. 213-219
- [24] Tipanna M., Kale D. D. "Composites of Waste, Ground Rubber Particles and Poly(vinyl chloride)." *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 70, no. 5, 1997. pp. 815-819.

- [25] ดิเรก ทองอร่าม, บรรณาธิการ. การออกแบบและเทคโนโลยีการให้น้ำแก่พืช.
กรุงเทพฯ : เจริญรัฐการพิมพ์.
- [26] Rothon R. Polymer science and technology series particulate filled polymer
composites. 1st Ed. New York : John Wiley & Sons. 1995.
- [27] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โครงการตำรา
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [28] บรรณ เลง ศรีนิล. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ : ดวงกลมสมัย. 2540.
- [29] James E.M., Burake E. and Frederick R.E. Science and Technology of Rubber.
2 nd Ed. United States : Academic Press, Inc. 1994.
- [30] ศรัชัย มูลคำ. บรรณาธิการ, การแปรรูปของที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 3.
2542.
- [31] Adhikari B., De D. and Maiti S. "Reclamation and recycling of waste rubber."
Progress in polymer, vol. 25, no. 7, 2000. pp. 909-948.
- [32] Indian Rubber Institute, Editor. Rubber Engineering. United States : McGraw-Hill.
2000.
- [33] Kurt R. "Welcome to the World of Scrap Tire Recycling." [Online]
: <http://www.ltra.com>. 2544.
- [34] Micro-flo industries. " Porous Pipe General Physical Specifications." [Online]
: <http://www.micro-flo.com>. 2544.
- [35] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
2527.
- [36] พิเชิด เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ : ปลัมพันธ์พานิชย์. 2538.
- [37] Brydson J.A. Plastic Materials. 5 th Ed. London : Butterworths. 1989.
- [38] The staff of modern plastics magazine, Editors. Plastics Handbook. United States
: McGraw-Hill. 1994.
- [39] Richardson T.L. Industrial Plastics : Theory and Application. 2 nd Ed. New York :
Delmer Publisher, Inc. 1989.
- [40] Baird R.J., David T.B. Industrial Plastics : Basic chemistry, major resins modern
industrial process. South Holland, IL : Goodheart-Willcox, Inc. 1982.

- [41] Nass L.I, Editor. Encyclopedia of PVC Volume 3 : Compounding Process, Product Design, and Specifications. 2 nd Ed. New York : Marcel Dekker, Inc. 1992.
- [42] Grulke E.A. Polymer Process Engineering. New Jersey : Prentice Hall. 1994.
- [43] อธิพิณ แจ่มชัด. พอลิเมอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [44] Chris R. Polymer Extrusion. 3 th Ed. Cincinnati : Hanser/Gardner. 1994.
- [45] Friedhelm H. Plastic Extrusion Technology. 2 nd Ed. Cincinnati : Hanser/Gardner. 1994.
- [46] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [47] ดร. กัญจนา ตระกูลคู. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ (Polymer Technology). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทกราฟแมนเพรสจำกัด.
- [48] Montgomery D.C., Runger G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 2 nd Ed. New York : John Wiley & Sons. 1999.
- [49] บริษัทปิโตรเคมีแห่งชาติ. ศัพท์บัญญัติปิโตรเคมีและคำอธิบาย. พิมพ์ครั้งที่ 1.

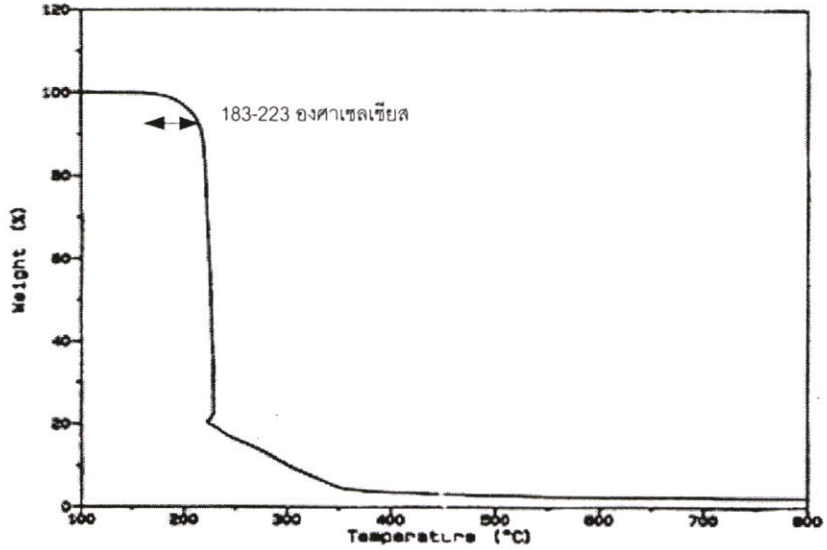
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

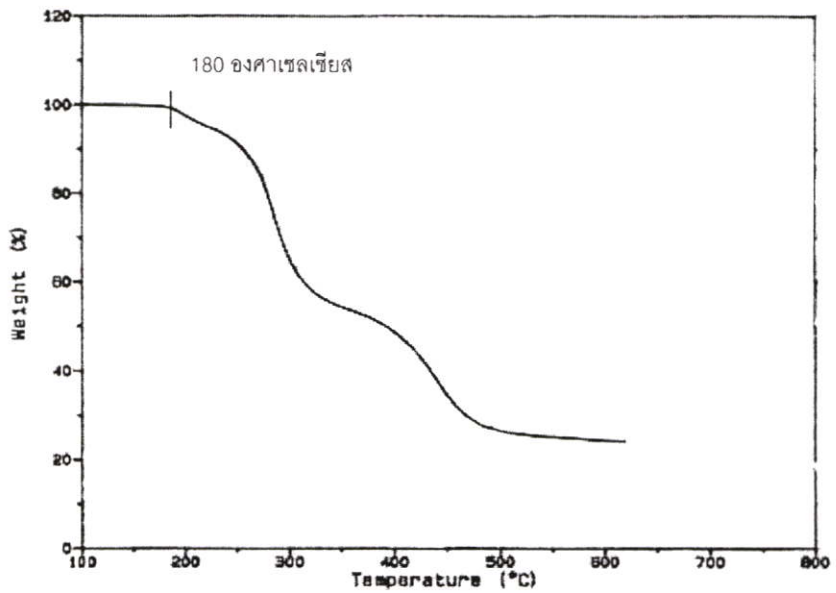
นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย [49]

1. พอลิเมอร์ (Polymer) หมายถึง สารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง 5,000 ขึ้นไป ได้จากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างกัน เช่น พอลิเอทิลีน ยาง เซลลูโลส
2. การเกิดพอลิเมอร์ (Polymerisation) หมายถึง ปฏิกิริยาที่ทำให้โมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เกิดปฏิกิริยาแบบกลั่นตัวหรือรวมตัวเป็นสายโซ่ยาว ๆ และมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหลายพันเท่าขึ้นไปของโมโนเมอร์ จึงได้คุณสมบัติต่าง ๆ แตกต่างไปจากของโมโนเมอร์
3. คอมเปานด์ (Compound) หมายถึง ของผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สารเพิ่มเนื้อ สารเสริมสภาพพลาสติก สี และตัวเร่งปฏิกิริยา ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน
4. สารเติมแต่ง (Additive) หมายถึง สารเคมีที่มีคุณสมบัติเฉพาะ ใช้เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติและตกแต่งให้สวยงาม ได้แก่ สารเพิ่มเนื้อ สารเพิ่มเสถียรภาพพลาสติก สี สารหล่อลื่น สารช่วยขึ้นรูป สารลดการสลายตัว สารกันออกซิเดชัน
5. Part per hundred parts of resins (phr) หมายถึง ส่วนในร้อยส่วนของเรซินหรือพลาสติก
6. อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) หมายถึง อุณหภูมิที่พอลิเมอร์สภาพอสัณฐาน หรือกึ่งผลึกเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งและเปราะ หรือสภาพแก้ว
7. โฟม (Foam) หมายถึง วัสดุความหนาแน่นต่ำที่มีฟองก๊าซอยู่ภายใน แบ่งออกเป็นโฟมคงรูป และโฟมยืดหยุ่น
8. ดาย (Die) หมายถึง ส่วนประกอบเครื่องอัดรีด มีลักษณะเป็นช่องให้พลาสติกหลอมผ่านออกมาเป็นรูปร่างตามต้องการ

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

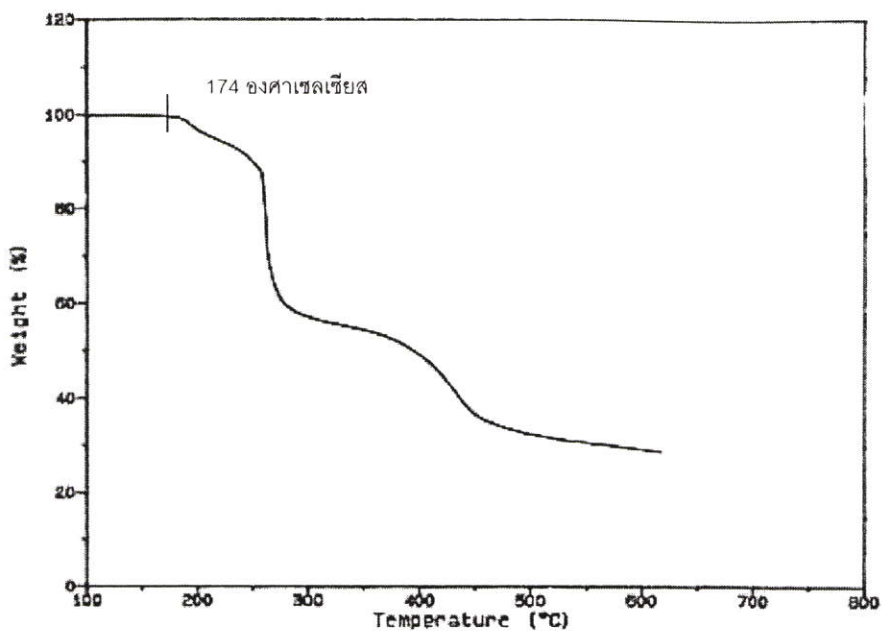


(ก) สารเอซีไดคาร์บอนาไมด์



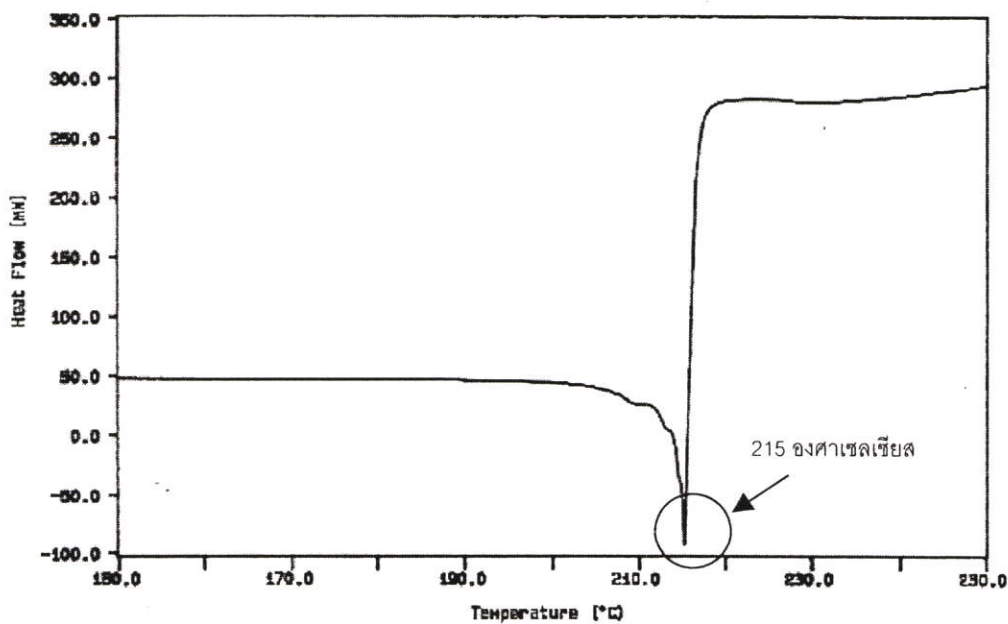
(ข) พอลิเมอร์ผสมไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอซีไดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดย
น้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไม่เติมซิงค์ออกไซด์ ขนาดผงยางรถยนต์ 30 เมช

รูปที่ ข-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง TGA



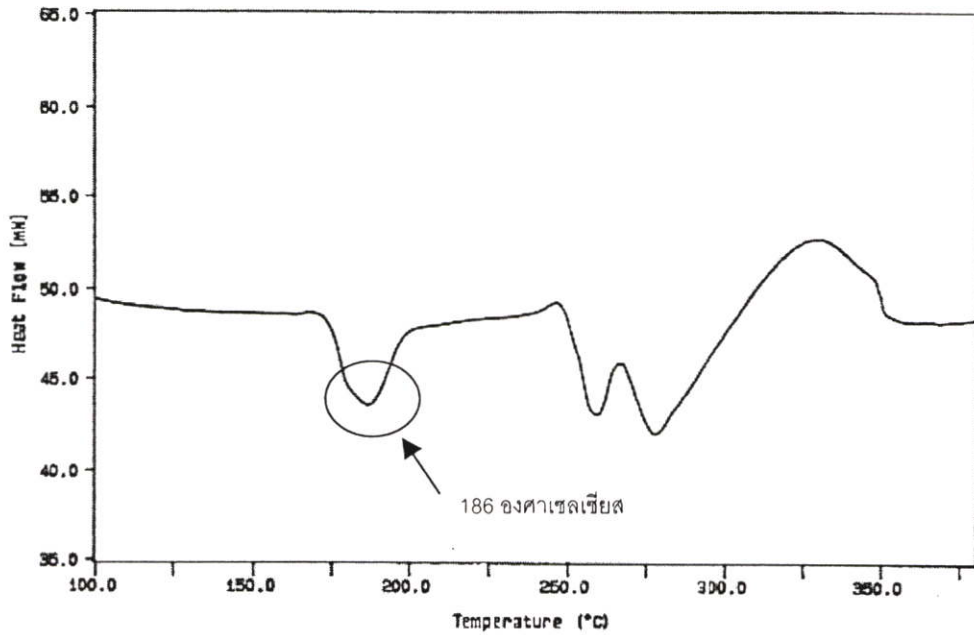
(ค) พอลิเมอร์ผสมไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซไดคาร์โบนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 เต็มซิงค์ออกไซด์ 5 phr ขนาดผงยางรถยนต์ 30 เมช

รูปที่ ข-1 (ต่อ)

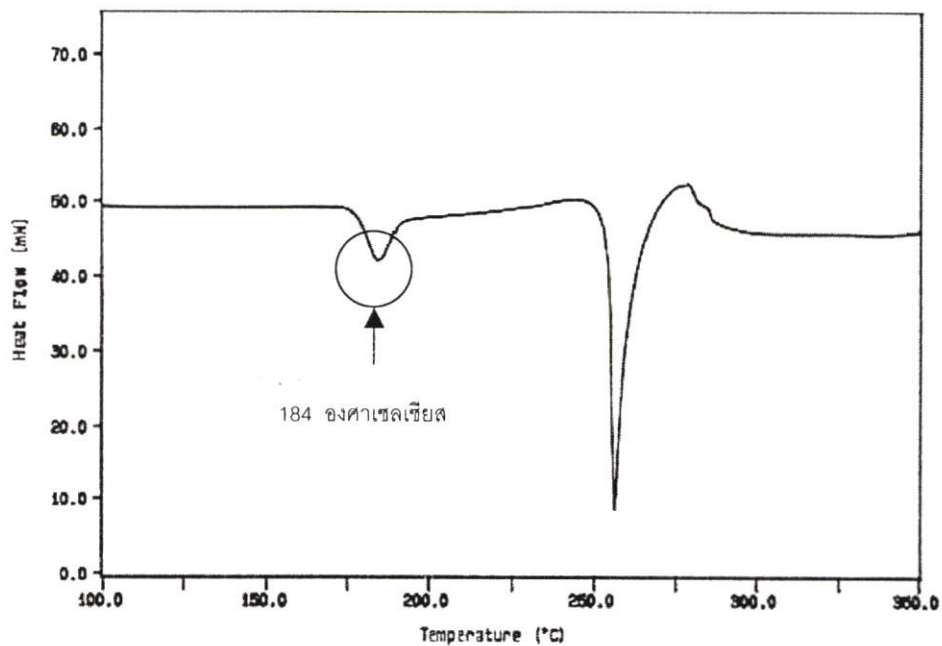


(ก) สารเอโซไดคาร์โบนาไมด์

รูปที่ ข-2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง DSC



- (ข) พอลิเมอร์ผสมไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซโดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 ไมเดมซิงค์ออกไซด์ ขนาดผงยางรถยนต์ 30 เมช

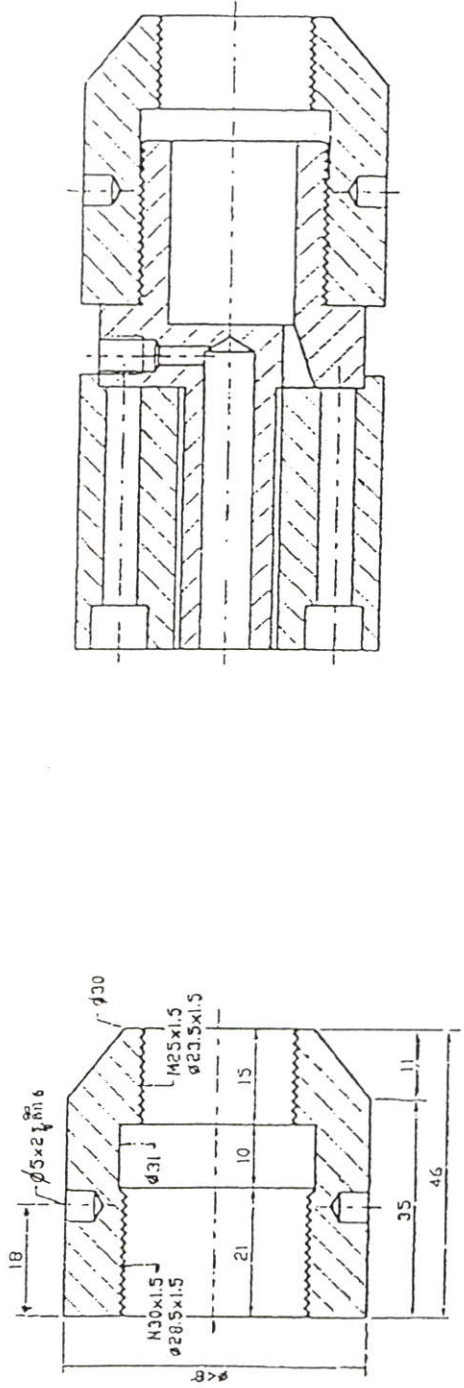
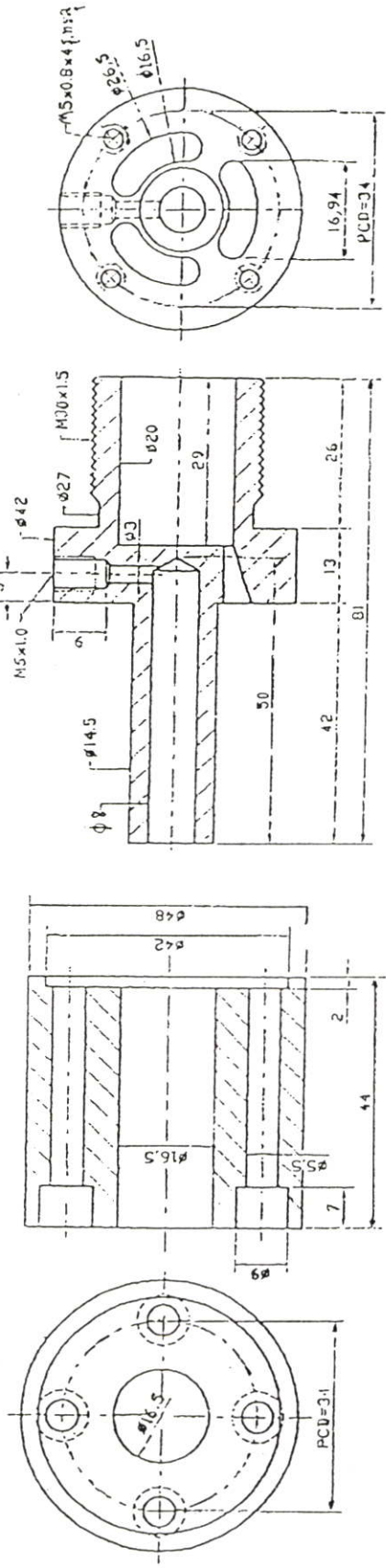


- (ค) พอลิเมอร์ผสมไดออกทิลพาทาเลต 40 phr เอโซโดคาร์บอนาไมด์ 14 phr อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ต่อพีวีซี 60/40 เดิมซิงค์ออกไซด์ 5 phr ขนาดผงยางรถยนต์ 30 เมช

ภาคผนวก ค

แบบหัวฉีดท่อไอน้ำงานวิจัยนี้

(มาตรฐาน 1:1)



ภาคผนวก ง

การหาพื้นที่รูปทรงจาก SEM micrographs โดยโปรแกรม AutoCAD

1. แทรก SEM micrograph ลงในโปรแกรม AutoCAD ใช้คำสั่ง Z
2. ใช้คำสั่ง di เพื่อหาระยะสเกลได้รูป SEM micrograph
3. นำค่า 500/ระยะสเกลได้รูป เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการเปลี่ยนสเกลเป็นอัตราส่วน 1:1 (500 ได้จากระยะสเกลที่แสดงในรูป SEM micrograph เช่น 500 ไมโครเมตร)
4. ใช้คำสั่ง sc เพื่อปรับสเกลให้เป็นอัตราส่วน 1:1
5. ตรวจสอบความยาวของสเกลว่ามีขนาด 500 ไมโครเมตร หรือไม่โดยใช้คำสั่ง di วัดสเกลได้รูป
6. เมื่อได้สเกลที่มีอัตราส่วน 1:1 แล้วใช้คำสั่ง area เพื่อหาพื้นที่ของรูปร่างที่ศึกษา

หมายเหตุ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาคผนวก จ

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบและท่อน้ำซึม



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method can be used for testing materials of any thickness up to 0.55 in. (14 mm). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 0.04 in. (1.0 mm) in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 0.55 in. must be reduced by machining.

NOTE 1—A complete metric companion to Test Method D 638 has been developed—D 638M.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant-rate-of-cross-head-movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D 229 and Test Method D 651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20 GPa ($>3.0 \times 10^6$ psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D 3039.

1.3 The values as stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D 20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Nov. 15, 1991. Published January 1992. Originally published as D 638 – 41 T. Last previous edition D 638 – 90.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation²
- D 374 Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation²
- D 412 Test Methods for Rubber Properties in Tension³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing⁴
- D 638M Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)⁴
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials²
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet⁴
- D 883 Terminology Relating to Plastics⁴
- D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials⁵
- D 3039 Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites⁶
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁷
- D 4066 Specification for Nylon Injection and Extrusion Materials (PA)⁷
- E 4 Practices for Load Verification of Testing Machines⁸
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁸
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁹

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883 and Annex A2.

4. Significance and Use

4.1 This test method is designed to produce tensile property data for the control and specification of plastic materials. These data are also useful for qualitative characterization and for research and development. For many materials, there may be a specification that requires the use

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

of this test method, but with some procedural modifications that take precedence when adhering to the specification. Therefore, it is advisable to refer to that material specification before using this test method. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

4.2 Tensile properties may vary with specimen preparation and with speed and environment of testing. Consequently, where precise comparative results are desired, these factors must be carefully controlled.

4.2.1 It is realized that a material cannot be tested without also testing the method of preparation of that material. Hence, when comparative tests of materials per se are desired, the greatest care must be exercised to ensure that all samples are prepared in exactly the same way, unless the test is to include the effects of sample preparation. Similarly, for referee purposes or comparisons within any given series of specimens, care must be taken to secure the maximum degree of uniformity in details of preparation, treatment, and handling.

4.3 Tensile properties may provide useful data for plastics engineering design purposes. However, because of the high degree of sensitivity exhibited by many plastics to rate of straining and environmental conditions, data obtained by this test method cannot be considered valid for applications involving load-time scales or environments widely different from those of this test method. In cases of such dissimilarity, no reliable estimation of the limit of usefulness can be made for most plastics. This sensitivity to rate of straining and environment necessitates testing over a broad load-time scale (including impact and creep) and range of environmental conditions if tensile properties are to suffice for engineering design purposes.

NOTE 5—Since the existence of a true elastic limit in plastics (as in many other organic materials and in many metals) is debatable, the propriety of applying the term “elastic modulus” in its quoted, generally accepted definition to describe the “stiffness” or “rigidity” of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are highly dependent on such factors as rate of application of stress, temperature, previous history of specimen, etc. However, stress-strain curves for plastics, determined as described in this test method, almost always show a linear region at low stresses, and a straight line drawn tangent to this portion of the curve permits calculation of an elastic modulus of the usually defined type. Such a constant is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and similar factors are realized.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—A testing machine of the constant-rate-of-crosshead-movement type and comprising essentially the following:

5.1.1 *Fixed Member*—A fixed or essentially stationary member carrying one grip.

5.1.2 *Movable Member*—A movable member carrying a second grip.

5.1.3 *Grips*—Grips for holding the test specimen between the fixed member and the movable member. The grips shall be self-aligning, that is, they shall be attached to the fixed and movable member, respectively, in such a manner that they will move freely into alignment as soon as any load is applied, so that the long axis of the test specimen will coincide with the direction of the applied pull through the

center line of the grip assembly. The specimens should be aligned as perfectly as possible with the direction of pull so that no rotary motion that may induce slippage will occur in the grips; there is a limit to the amount of misalignment self-aligning grips will accommodate.

5.1.3.1 The test specimen shall be held in such a way that slippage relative to the grips is prevented insofar as possible. Grip surfaces that are deeply scored or serrated with a pattern similar to those of a coarse single-cut file, serrations about 0.09 in. (2.4 mm) apart and about 0.06 in. (1.6 mm) deep, have been found satisfactory for most thermoplastics. Finer serrations have been found to be more satisfactory for harder plastics, such as the thermosetting materials. The serrations should be kept clean and sharp. Breaking in the grips may occur at times, even when deep serrations or abraded specimen surfaces are used; other techniques must be used in these cases. Other techniques that have been found useful, particularly with smooth-faced grips, are abrading that portion of the surface of the specimen that will be in the grips, and interposing thin pieces of abrasive cloth, abrasive paper, or plastic or rubber-coated fabric, commonly called hospital sheeting, between the specimen and the grip surface. No. 80 double-sided abrasive paper has been found effective in many cases. An open-mesh fabric, in which the threads are coated with abrasive, has also been effective. Reducing the cross-sectional area of the specimen may also be effective. The use of special types of grips is sometimes necessary to eliminate slippage and breakage in the grips.

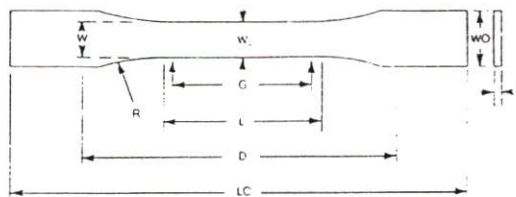
5.1.4 *Drive Mechanism*—A drive mechanism for imparting to the movable member a uniform, controlled velocity with respect to the stationary member, with this velocity to be regulated as specified in Section 9.

5.1.5 *Load Indicator*—A suitable load-indicating mechanism capable of showing the total tensile load carried by the test specimen when held by the grips. This mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the indicated value, or better. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

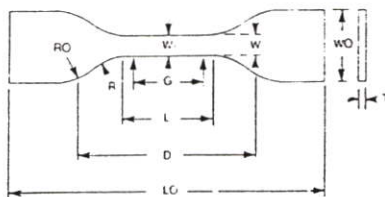
NOTE 6—Experience has shown that many testing machines now in use are incapable of maintaining accuracy for as long as the periods between inspection recommended in Practices E 4. Hence, it is recommended that each machine be studied individually and verified as often as may be found necessary. It frequently will be necessary to perform this function daily.

5.1.6 The fixed member, movable member, drive mechanism, and grips shall be constructed of such materials and in such proportions that the total elastic longitudinal strain of the system constituted by these parts does not exceed 1% of the total longitudinal strain between the two gage marks on the test specimen at any time during the test and at any load up to the rated capacity of the machine.

5.2 *Extension Indicator* (extensometer)—A suitable instrument shall be used for determining the distance between two designated points within the gage length of the test specimen as the specimen is stretched. For referee purposes, the extensometer must be set at the full gage length of the specimen, as shown in Fig. 1. It is desirable, but not essential, that this instrument automatically record this distance, or any change in it, as a function of the load on the test specimen, or of the elapsed time from the start of the test, or

 D 638


TYPES I and II



TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, T , in. (mm)^D

Dimensions (see drawings)	0.28 (7) or under		Over 0.28 to 0.55 (7 to 14) incl.	0.16 (4) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^G	Type V ^I	
W —Width of narrow section ^{A, B}	0.50 (13)	0.25 (6)	0.75 (19)	0.25 (6)	0.125 (3.18)	± 0.02 (± 0.5) ^{G, I}
L —Length of narrow section	2.25 (57)	2.25 (57)	2.25 (57)	1.30 (33)	0.375 (9.53)	± 0.02 (± 0.5) ^I
WO —Width over-all, min ^F	0.75 (19)	0.75 (19)	1.13 (29)	0.75 (19)	...	+0.25 (+6.4)
WO —Width over-all, min ^F	...	...	...	...	0.375 (9.53)	+0.125 (+3.18)
LO —Length over-all, min ^F	6.5 (165)	7.2 (183)	9.7 (246)	4.5 (115)	2.5 (63.5)	no max (no max)
G —Gage length ^C	2.00 (50)	2.00 (50)	2.00 (50)	...	0.300 (7.62)	± 0.010 (± 0.25) ^I
G —Gage length ^C	...	...	...	1.00 (25)	...	± 0.005 (± 0.13)
D —Distance between grips	4.5 (115)	5.3 (135)	4.5 (115)	2.5 ^H (64)	1.0 (25.4)	± 0.2 (± 5)
R —Radius of fillet	3.00 (76)	3.00 (76)	3.00 (76)	0.56 (14)	0.5 (12.7)	± 0.04 (± 1) ^I
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	1.00 (25)	...	± 0.04 (± 1)

^A The width at the center W_c shall be $+0.000$ in., -0.004 in. ($+0.00$ mm, -0.10 mm) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^B For molded specimens, a draft of not over 0.005 in. (0.13 mm) may be allowed for either Type I or II specimens 0.13 in. (3.2 mm) in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

^C Test marks or initial extensometer span.

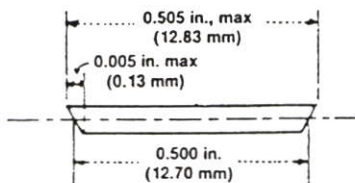
^D Thickness, T , shall be 0.13 ± 0.02 in. (3.2 ± 0.4 mm) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 0.55 in. (14 mm) the specimens shall be machined to 0.55 ± 0.02 in. (14 ± 0.4 mm) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 0.55 and 2 in. (14 and 51 mm) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet, shall be noted. Tolerances on thickness less than 0.55 in. (14 mm) shall be those standard for the grade of material tested.

^E Overall widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^F Overall lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

^G For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 0.250 ± 0.002 in. (6.00 ± 0.05 mm). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D 412.

^H When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.



^I The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

- $W = 0.125 \pm 0.001$ in. (3.18 ± 0.03 mm),
 $L = 0.375 \pm 0.003$ in. (9.53 ± 0.08 mm),
 $G = 0.300 \pm 0.001$ in. (7.62 ± 0.02 mm), and
 $R = 0.500 \pm 0.003$ in. (12.7 ± 0.08 mm).

The other tolerances are those in the table.

^J Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D 20-1038.

FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

both. If only the latter is obtained, load-time data must also be taken. This instrument shall be essentially free of inertia at the specified speed of testing. Extensometers shall be classified and their calibration periodically verified in accordance with Practice E 83.

5.2.1 *Modulus-of-Elasticity Measurements*—For modulus-of-elasticity measurements, an extensometer with a maximum strain error of 0.0002 in./in. that automatically and continuously records shall be used. A Class B-2 extensometer (Practice E 83) meets this requirement.

5.2.2 *Low-Extension Measurements*—For elongation-at-yield and low-extension measurements (nominally 20 % or less), the same above extensometer, attenuated to 20 % extension, may be used. In any case, the extensometer system must meet at least Class C (Practice E 83) requirements, which include a fixed strain error of 0.001 strain or ± 1.0 % of the indicated strain, whichever is greater.

5.2.3 *High Extension Measurements*—For making measurements at elongations greater than 20 %, measuring techniques with error no greater than ± 10 % of the measured value are acceptable.

5.3 *Micrometers*—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.001 in. (0.025 mm) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: (1) a contact measuring pressure of 3.6 ± 0.36 psi (25 ± 2.5 kPa), (2) a movable circular contact foot 0.250 ± 0.001 in. (6.35 ± 0.025 mm) in diameter, and (3) a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.0002 (0.005 mm) in. over the entire foot area. Flatness of foot and anvil shall conform to the portion of the Calibration Section of Test Methods D 374, which addresses "flatness of surfaces of micrometers."

5.3.1 An optional instrument equipped with a circular contact foot 0.625 ± 0.003 in. (15.88 ± 0.08 mm) in diameter is recommended for thickness measuring of process samples or larger specimens at least 0.625 in. (15.88 mm) in minimum width.

6. Test Specimens

6.1 *Sheet, Plate, and Molded Plastics:*

6.1.1 *Rigid and Semirigid Plastics*—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type I specimen is the preferred specimen and shall be used where sufficient material having a thickness of 0.28 in. (7 mm) or less is available. The Type II specimen may be used when a material does not break in the narrow section with the preferred Type I specimen. The Type V specimen shall be used where only limited material having a thickness of 0.16 in. (4 mm) or less is available for evaluation, or where a large number of specimens are to be exposed in a limited space (thermal and environmental stability tests, etc.). The Type IV specimen should be used when direct comparisons are required between materials in different rigidity cases (that is, nonrigid and semirigid). The Type III specimen must be used for all materials with a thickness of greater than 0.28 in. (7 mm) but not more than 0.55 in. (14 mm).

6.1.2 *Nonrigid Plastics*—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type IV specimen shall be used for testing nonrigid plastics with a thickness of 0.16 in. (4 mm) or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 0.28 in. (7 mm) but not more than 0.55 in. (14 mm).

6.1.3 *Reinforced Composites*—The test specimen for reinforced composites, including highly orthotropic laminates, shall conform to the dimensions of the Type I specimen shown in Fig. 1.

6.1.4 *Preparation*—Test specimens shall be prepared by machining operations, or die cutting, from materials in sheet, plate, slab, or similar form. Materials thicker than 0.55 in. (14 mm) must be machined to 0.55 in. (14 mm) for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.

NOTE 7—Test results have shown that for some materials such as glass cloth, SMC, and BMC laminates, other specimen types should be considered to ensure breakage within the gage length of the specimen, as mandated by 8.3.

NOTE 8—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in cutting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower laminate properties, unless testing of specimens in a direction other than parallel with the reinforcement constitutes a variable being studied.

NOTE 9—Specimens prepared by injection molding may have different tensile properties than specimens prepared by machining or die-cutting because of the orientation induced. This effect may be more pronounced in specimens with narrow sections.

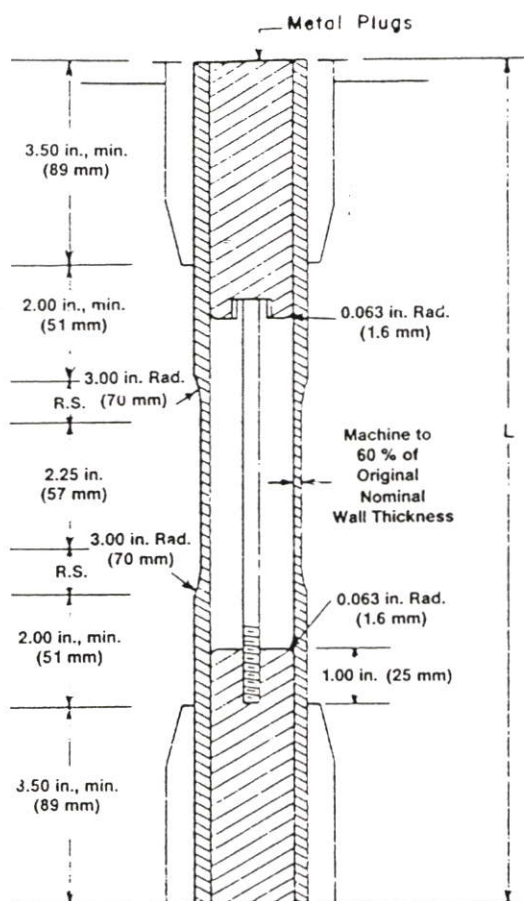
6.2 *Rigid Tubes:*

6.2.1 The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60 % of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 2.25 in. (57.2 mm) in length with a radius of 3 in. (76 mm) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 1 in. (25 mm) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods:*

6.3.1 The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60 % of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 2.25 in. (57.2 mm) in length with a radius of 3 in. (76 mm) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the

 D 638


DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Speci- men to be Used for 3.5-in. (89- mm) Jaws ^A
		in. (mm)	
1/32 (0.79)	0.547 (13.9)	13.80 (350)	15 (381)
3/64 (1.2)	0.670 (17.0)	13.92 (354)	15 (381)
1/16 (1.6)	0.773 (19.6)	14.02 (356)	15 (381)
3/32 (2.4)	0.946 (24.0)	14.20 (361)	15 (381)
1/8 (3.2)	1.091 (27.7)	14.34 (364)	15 (381)
3/16 (4.8)	1.333 (33.9)	14.58 (370)	15 (381)
1/4 (6.4)	1.536 (39.0)	14.79 (376)	15.75 (400)
5/16 (7.9)	1.714 (43.5)	14.96 (380)	15.75 (400)
3/8 (9.5)	1.873 (47.6)	15.12 (384)	15.75 (400)
7/16 (11.1)	2.019 (51.3)	15.27 (388)	15.75 (400)
1/2 (12.7)	2.154 (54.7)	15.40 (391)	16.5 (419)

^A For other jaws greater than 3.5 in. (89 mm), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 7 in. (178 mm). The standard length permits a slippage of approximately 0.25 to 0.50 in. (6.4 to 12.7 mm) in each jaw while maintaining maximum length of jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.

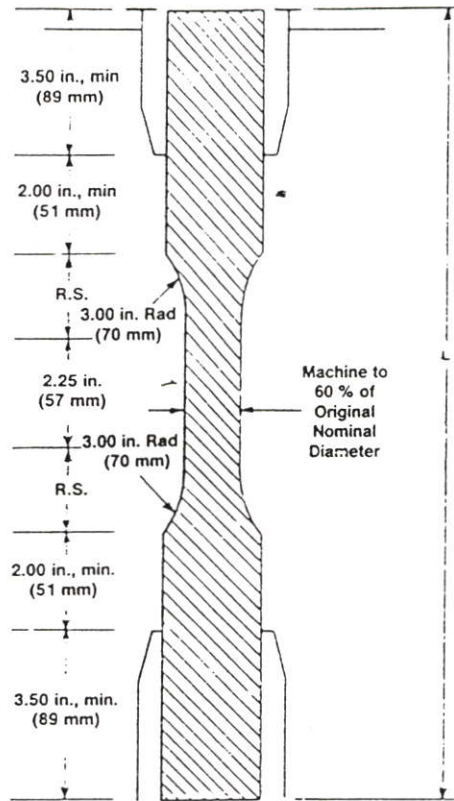
6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of

anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Conditioning

7.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618, for those tests where conditioning is re-

 D 638


DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, <i>L</i> , of Specimen to be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^A
1/8 (3.2)	0.773 (19.6)	14.02 (356)	15 (381)
1/16 (4.7)	0.946 (24.0)	14.20 (361)	15 (381)
1/4 (6.4)	1.091 (27.7)	14.34 (364)	15 (381)
3/8 (9.5)	1.333 (33.9)	14.58 (370)	15 (381)
1/2 (12.7)	1.536 (39.0)	14.79 (376)	15.75 (400)
5/8 (15.9)	1.714 (43.5)	14.96 (380)	15.75 (400)
3/4 (19.0)	1.873 (47.6)	15.12 (384)	15.75 (400)
7/8 (22.2)	2.019 (51.5)	15.27 (388)	15.75 (400)
1 (25.4)	2.154 (54.7)	15.40 (391)	16.5 (419)
1¼ (31.8)	2.398 (60.9)	15.65 (398)	16.5 (419)
1½ (38.1)	2.615 (66.4)	15.87 (403)	16.5 (419)
1¾ (42.5)	2.812 (71.4)	16.06 (408)	16.5 (419)
2 (50.8)	2.993 (76.0)	16.24 (412)	17 (432)

^A For other jaws greater than 3.5 in. (89 mm), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 7 in. (178 mm). The standard length permits a slippage of approximately 0.25 to 0.50 (6.4 to 12.7 mm) in each jaw while maintaining maximum length of jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

quired. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1.8^\circ\text{F}$ ($\pm 1^\circ\text{C}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

7.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing "dry as-molded specimens." Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50% relative humidity and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

7.2 Test Conditions—Conduct tests in the Standard Laboratory Atmosphere of $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the test methods. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1.8^\circ\text{F}$ (1°C) and $\pm 2\%$ relative humidity.

NOTE 10—The tensile properties of some plastics change rapidly with small changes in temperature. Since heat may be generated as a result of straining the specimen at high rates, conduct tests without forced cooling to ensure uniformity of test conditions. Measure the temperature in the reduced section of the specimen and record it for materials where self-heating is suspected.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, in./min	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, in./in.·min
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	0.2 ± 25 %	0.1
		2 ± 10 %	1
		20 ± 10 %	10
	IV	0.2 ± 25 %	0.15
		2 ± 10 %	1.5
		20 ± 10 %	15
V	0.05 ± 25 %	0.1	
	0.5 ± 25 %	1	
	5 ± 25 %	10	
Nonrigid	III	2 ± 10 %	1
		20 ± 10 %	10
	IV	2 ± 10 %	1.5
		20 ± 10 %	15

^A Select the lowest speed that produces rupture in ½ to 5 min for the specimen geometry being used (see 9.2).

^B See Definitions D 883 for definitions.

^C The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

8. Number of Test Specimens

8.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

8.2 Test ten specimens, five normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

8.3 Discard specimens that break at some obvious fortuitous flaw, or that do not break between the predetermined gage marks, and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

NOTE 11—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

9. Speed of Testing

9.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. Rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

9.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within ½ to 5 min testing time.

9.3 Modulus determinations may be made at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

TABLE 2 Modulus, 10⁶ psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.246	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.614
Glass-reinforced polyester	1.39	0.0894	0.266	0.253	0.753

TABLE 3 Tensile Stress at Yield, 10³ psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
Polypropylene	3.63	0.022	0.161	0.062	0.456
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.058	0.227	0.164	0.642
Acrylic	10.4	0.067	0.317	0.190	0.897

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of rigid flat specimens (Fig. 1) with a suitable micrometer to the nearest 0.001 in. (0.025 mm) at several points along their narrow sections. Measure the thickness of nonrigid specimens (produced by a Type IV die) in the same manner with the required dial micrometer. Take the width of this specimen as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section. Measure the diameter of rod specimens, and the inside and outside diameters of tube specimens, to the nearest 0.001 in. (0.025 mm) at a minimum of two points 90° apart; make these measurements along the groove for specimens so constructed. Use plugs in testing tube specimens, as shown in Fig. 2.

10.2 Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the specimen and the grips with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. The distance between the ends of the gripping surfaces, when using flat specimens, shall be as indicated in Fig. 1. On tube and rod specimens, the location for the grips shall be as shown in Figs. 2 and 3. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

10.3 Attach the extension indicator. When modulus is being determined, the extension indicator must continuously record the distance the specimen is stretched (elongated) within the gage length as a function of the load through the initial (linear) portion of the load-elongation curve.

NOTE 12—Modulus of materials is determined from the slope of the linear portion of the stress-strain curve. For most plastics, this linear portion is very small, occurs very rapidly, and must be recorded automatically. The change in jaw separation is never to be used for calculating modulus or elongation.

10.4 Set the speed of testing at the proper rate as required in Section 9, and start the machine.

10.5 Record the load-extension curve of the specimen.

10.6 Record the load and extension at the yield point (if one exists) and the load and extension at the moment of rupture.

NOTE 13—If it is desired to measure both modulus and failure properties (yield or break, or both), it may be necessary, in the case of highly extensible materials, to run two independent tests. The high magnification extensometer normally used to determine properties up to the yield point may not be suitable for tests involving high extensibility. If allowed to remain attached to the specimen, the extensometer could

TABLE 4 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
Cellulose acetate butyrate	3.65	0.27	0.62	0.76	1.75
Acrylic	4.89	0.21	0.55	0.59	1.56
Polypropylene	8.79	0.45	5.86	1.27	16.5

TABLE 5 Tensile Strength at Break, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S _r	S _R	l _r	l _R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.180	0.164	0.509
Acrylic	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
Glass-reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
Glass-reinforced nylon	23.6	0.277	0.698	0.784	1.98

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 6 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S _r	S _R	l _r	l _R
Glass-reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
Glass-reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
Acrylic	13.2	2.05	3.65	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	6.62	5.29	18.7
Polypropylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

be permanently damaged. A broad range incremental extensometer or hand rule technique may be needed when such materials are taken to rupture.

11. Calculation

11.1 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load in newtons (or pounds-force) by the original minimum cross-sectional area of the specimen in square metres (or square inches). Express the result in pascals (or pounds-force per square inch) and report it to three significant figures as tensile strength at yield or tensile strength at break, whichever term is applicable. When a nominal yield or break load less than the maximum is present and applicable, it may be desirable also to calculate, in a similar manner, the corresponding tensile stress at yield or tensile stress at break and report it to three significant figures (see Note A2.8).

11.2 *Percent Elongation*—If the specimen gives a yield load that is larger than the load at break, calculate percent elongation at yield. Otherwise, calculate percent elongation at break. Do this by reading the extension (change in gage length) at the moment the applicable load is reached. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100. Report percent elongation at yield or percent elongation at break to two significant figures. When a yield or breaking load less than the maximum is present and of interest, it is desirable to calculate and report both percent elongation at yield and percent elongation at break (see Note A2.2).

11.3 *Modulus of Elasticity*—Calculate the modulus of elasticity by extending the initial linear portion of the load-extension curve and dividing the difference in stress corresponding to any segment of section on this straight line by the corresponding difference in strain. All elastic modulus values shall be computed using the average initial cross-

sectional area of the test specimens in the calculations. The result shall be expressed in pounds-force per square inch (pascals) and reported to three significant figures.

11.4 *Secant modulus*—At a designated strain, this shall be calculated by dividing the corresponding stress (nominal) by the designated strain. Elastic modulus values are preferable and shall be calculated whenever possible. However, for materials where no proportionality is evident, the secant value shall be calculated. Draw the tangent as directed in A1.3 and Fig. A1.2, and mark off the designated strain from the yield point where the tangent line goes through zero stress. The stress to be used in the calculation is then determined by dividing the load-extension curve by the original average cross-sectional area of the specimen.

11.5 For each series of tests, calculate the arithmetic mean of all values obtained and report it as the "average value" for the particular property in question.

11.6 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n - 1)}$$

where:

s = estimated standard deviation,

X = value of single observation,

n = number of observations, and

\bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

11.7 See Annex A1 for information on toe compensation.

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code numbers, form, principal dimensions, previous history, etc.,

12.1.2 Method of preparing test specimens,

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,

12.1.9 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,

12.1.10 Percent elongation at yield or break (or both, as applicable), average value, and standard deviation,

12.1.11 Modulus of elasticity, average value, and standard deviation, and

12.1.12 Date of test.

13. Precision and Bias¹⁰

13.1 Tables 2 through 6 are based on a round robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

13.2 Tables 7 through 10 are based on a round robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, in-

¹⁰ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1125 for the 1984 round robin and RR:D20-1170 for the 1988 round robin.

TABLE 7 Tensile Yield Strength, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	1544	52.4	64.0	146.6	179.3
LDPE	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.8	279.7
LLDPE	20	1791	49.2	75.8	137.9	212.3
LLDPE	20	2900	55.5	87.9	155.4	246.1
LLDPE	20	1730	63.9	96.0	178.9	268.7
HDPE	2	4101	196.1	371.9	549.1	1041.3
HDPE	2	3523	175.9	478.0	492.4	1338.5

TABLE 8 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	8.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.58	2.86	6.57
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.97
LLDPE	20	16.6	1.59	3.30	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.88	3.56	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.55	7.25
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.63	1.23	2.75	3.45	7.71

volving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.3 In Tables 2 through 10, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

13.3.1 S_r is the within-laboratory standard deviation of the average; $I_r = 2.83 S_r$. (See 13.3.3 for application of I_r .)

13.3.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the average; $I_R = 2.83 S_R$. (See 13.3.4 for application of I_R .)

13.3.3 *Repeatability*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material and condition.

TABLE 9 Tensile Break Strength, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	1592	52.3	74.9	146.4	209.7
LDPE	20	1750	66.6	102.9	186.4	288.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	355.8	613.3
LLDPE	20	2840	78.6	143.5	220.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	95.96	131.6
LLDPE	20	2360	119.1	166.3	333.6	465.6

TABLE 10 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	567	31.5	59.5	88.2	166.6
LDPE	20	569	61.5	89.2	172.3	249.7
LLDPE	20	890	25.7	113.8	71.9	318.7
LLDPE	20	64.4	6.68	11.7	18.7	32.6
LLDPE	20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
LLDPE	20	782	41.6	96.7	116.6	273.8

13.3.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)

13.3.5 Any judgment in accordance with 13.3.3 and 13.3.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.3.6 Other formulations may give somewhat different results.

13.4 For further information on the methodology used in this section, see Practice E 691.

13.5 There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

13.6 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.

14. Keywords

14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; tensile properties; tensile strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

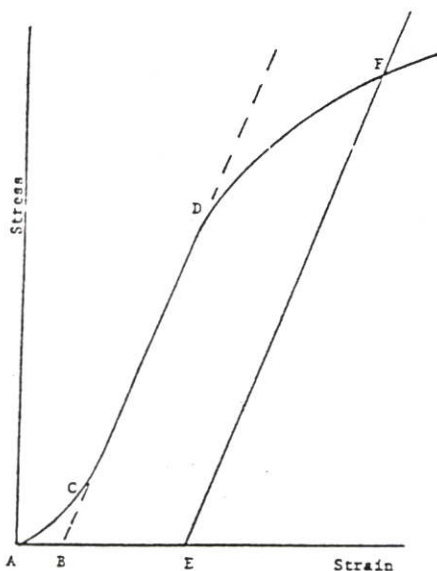
A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC , that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack, and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at

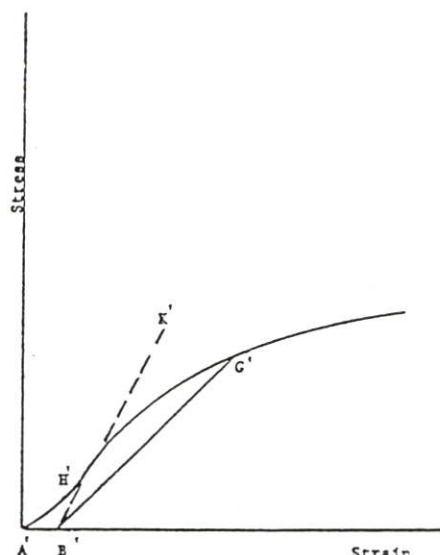
any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from point B , defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H'). This is extended to intersect the strain axis at point B' , the corrected zero-strain point. Using point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of line $B'G'$). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.1 Material with Hookean Region



NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 *elastic limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any permanent strain remaining upon complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

NOTE A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, eccentricity of loading, the scale to which the stress-strain diagram is plotted, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 *elongation*—the increase in length produced in the gage length of the test specimen by a tensile load. It is

expressed in units of length, usually inches (millimetres). (Also known as *extension*.)

NOTE A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is present. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of qualitative utility after attainment of yield point. This is due to inability to assure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 *gage length*—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 *modulus of elasticity*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a

material. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals) (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*).

NOTE A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as the modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of stressing, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 *necking*—the localized reduction in cross-section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 *offset yield strength*—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

NOTE A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1): On the strain axis lay off OM equal to the specified offset.

Draw OA tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain curve.

Through M draw a line MN parallel to OA and locate the intersection of MN with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection r is the "offset yield strength." The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. *Example:* 0.1 % offset yield strength = . . . psi (MPa), or *yield strength at 0.1 % offset* . . . psi (MPa).

A2.7 *percent elongation*—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 *percent elongation at break and yield:*

A2.8.1 *percent elongation at break*—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

A2.8.2 *percent elongation at yield*—the percent elongation at the moment the yield point (A2.21) is attained in the test specimen.

A2.9 *percent reduction of area (nominal)*—the difference

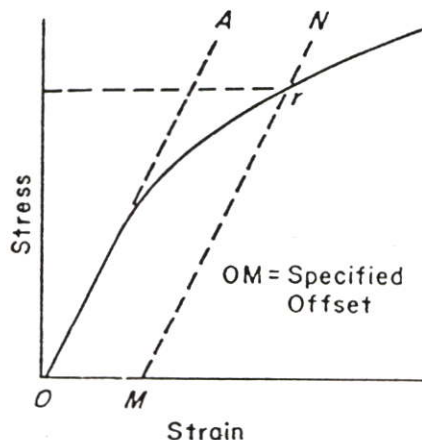


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

between the original cross-sectional area measured at the point of rupture after breaking and after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

A2.10 *percent reduction of area (true)*—the difference between the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage boundaries prevailing at the moment of rupture, expressed as a percentage of the original area.

A2.11 *proportional limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

A2.12 *rate of loading*—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit time, usually pounds-force (newtons) per minute. The initial rate of loading can be calculated from the initial slope of the load versus time diagram.

A2.13 *rate of straining*—the change in tensile strain per unit time. It is expressed either as strain per unit time, usually inches per inch (metres per metre) per minute, or percent elongation per unit time, usually percent elongation per minute. The initial rate of straining can be calculated from the initial slope of the tensile strain versus time diagram.

NOTE A2.5—The initial rate of straining is synonymous with the rate of crosshead movement divided by the initial distance between crossheads only in a machine with constant-rate-of-crosshead movement and when the specimen has a uniform original cross-section, does not "neck down," and does not slip in the jaws.

A2.14 *rate of stressing (nominal)*—the change in tensile stress (nominal) per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually pounds-force per square inch (megapascals) per minute. The initial rate of stressing can be calculated from the initial slope of the tensile stress (nominal) versus time diagram.

NOTE A2.6—The initial rate of stressing as determined in this manner has only limited physical significance. It does, however, roughly describe the average rate at which the initial stress (nominal) carried by the test specimen is applied. It is affected by the elasticity and flow characteristics of the materials being tested. At the yield point, the rate of stressing (true) may continue to have a positive value if the cross-sectional area is decreasing.

A2.15 *secant modulus*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain at any specified point on the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals), and reported together with the specified stress or strain.

NOTE A2.7—This measurement is usually employed in place of modulus of elasticity in the case of materials whose stress-strain diagram does not demonstrate proportionality of stress to strain.

A2.16 *strain*—the ratio of the elongation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length. It is expressed as a dimensionless ratio.

A2.17 *tensile strength (nominal)*—the maximum tensile stress (nominal) sustained by the specimen during a tension test. When the maximum stress occurs at the yield point (A2.21), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

 D 638

A2.18 *tensile stress (nominal)*—the tensile load per unit area of minimum original cross-section, within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

NOTE A2.8—The expression of tensile properties in terms of the minimum original cross-section is almost universally used in practice. In the case of materials exhibiting high extensibility, or necking, or both, (A2.15) nominal stress calculations may not be meaningful beyond the yield point (A2.21) due to the extensive reduction in cross-sectional area that ensues. Under some circumstances it may be desirable to express the tensile properties per unit of minimum prevailing cross-section. These properties are called true tensile properties (that is, true tensile stress, etc.).

A2.19 *tensile stress-strain curve*—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.20 *true strain* (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_T :

$$\epsilon_T = \int_{L_o}^L dL/L = \ln L/L_o$$

where:

dL = the increment of elongation when the distance between the gage marks is L ,

L_o = the original distance between gage marks, and

L = the distance between gage marks at any time.

A2.21 *yield point*—the first point on the stress-strain curve at which an increase in strain occurs without an increase in stress (Fig. A2.2).

NOTE A2.9—Only materials whose stress-strain curves exhibit a point of zero slope may be considered as having a yield point.

NOTE A2.10—Some materials exhibit a distinct “break” or discontinuity in the stress-strain curve in the elastic region. This break is not a yield point by definition. However, this point may prove useful for material characterization in some cases.

A2.22 *yield strength*—the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. Unless otherwise specified, this stress will be the stress at the yield point and when expressed in relation to the tensile strength shall be designated either tensile strength at yield or tensile stress at yield as required under A2.17 (Fig. A2.3). (See *offset yield strength*.)

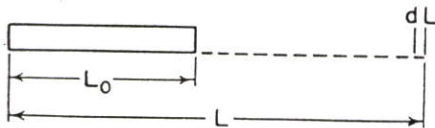


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

A2.23 *Symbols*—The following symbols may be used for the above terms:

SYMBOL	TERM
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_o	Original distance between gage marks
L_u	Distance between gage marks at moment of rupture
ΔL	Increment of distance between gage marks = elongation
A	Minimum cross-sectional area at any time
A_o	Original cross-section area
ΔA	Increment of cross-sectional area
A_u	Cross-sectional area at point of rupture measured after breaking specimen
A_T	Cross-sectional area at point of rupture, measured at the moment of rupture
t	Time
Δt	Increment of time
σ	Tensile stress
$\Delta \sigma$	Increment of stress
σ_T	True tensile stress
σ_U	Tensile strength at break (nominal)
σ_{UT}	Tensile strength at break (true)
ϵ	Strain
$\Delta \epsilon$	Increment of strain
ϵ_U	Total strain, at break
ϵ_T	True strain
$\%El$	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity

A2.24 Relations between these various terms may be defined as follows:

$$\sigma = W/A_o$$

$$\sigma_T = W/A$$

$$\sigma_U = W/A_o \text{ (where } W \text{ is breaking load)}$$

$$\sigma_{UT} = W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)}$$

$$\epsilon = \Delta L/L_o = (L - L_o)/L_o$$

$$\epsilon_U = (L_u - L_o)/L_o$$

$$\epsilon_T = \int_{L_o}^L dL/L = \ln L/L_o$$

$$\%El = [(L - L_o)/L_o] \times 100 = \epsilon \times 100$$

$$\text{Percent reduction of area (nominal)} = [(A_o - A_u)/A_o] \times 100$$

$$\text{Percent reduction of area (true)} = [(A_o - A_T)/A_o] \times 100$$

$$\text{Rate of loading} = \Delta W/\Delta t$$

$$\text{Rate of stressing (nominal)} = \Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W/A_o)/\Delta t$$

$$\text{Rate of straining} = \Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_o)/\Delta t$$

For the case where the volume of the test specimen does not change during the test, the following three relations hold:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon) = \sigma L/L_o$$

$$\sigma_{UT} = \sigma_U(1 + \epsilon_U) = \sigma_U L_u/L_o$$

$$A = A_o/(1 + \epsilon)$$

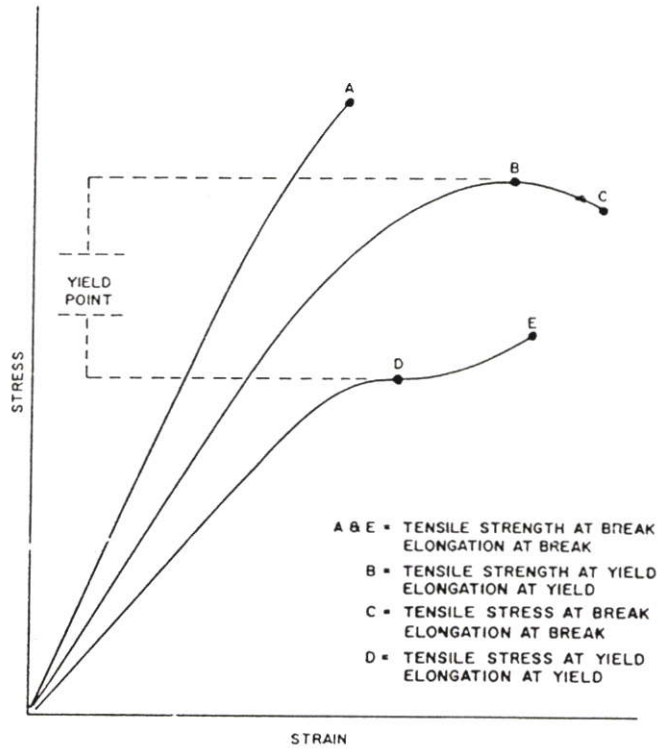
 D 638


FIG. A2.3 Tensile Designations

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness¹

This standard is issued under the fixed designation D 2240; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method describes seven types of durometers A, B, C, D, DO, O and OO, and the procedure for determining indentation hardness of substances classified as rubber, cellular materials, elastomeric materials, thermoplastic elastomers and some hard plastics.

1.2 This test method is not applicable to the testing of fabrics.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing²

D 785 Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials²

D 1349 Practice for Rubber—Standard Temperatures For Testing³

D 4483 Practice for Determining Precision for Test Method Standards in the Rubber and Carbon Black Industries⁴

3. Summary of Test Method

3.1 This test method permits hardness measurements based on either initial indentation or indentation after a specified period of time, or both.

NOTE 1—Durometers with maximum reading pointers used to determine initial hardness values may yield lower hardness when the maximum pointer is used.

4. Significance and Use

4.1 This test method is based on the penetration of a specific type of indenter when forced into the material under specified conditions. The indentation hardness is inversely related to the penetration and is dependent on the elastic modulus and viscoelastic behavior of the material. The shape

of the indenter and the applied force influence the results obtained so there may be no simple relationship between the results obtained with one type of durometer and those obtained with another type of durometer or other instruments for measuring hardness. This test method is an empirical test intended primarily for control purposes. No simple relationship is known to exist between indentation hardness determined by this test method and any fundamental property of the material tested. For specification purposes it is recommended that Test Method D 785 be used for hard material.

NOTE 2—Durometer scale comparison chart only. This is not and cannot be used as a conversion reference.

Type A	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100						
Type B		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100					
Type C			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
Type D				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
Type DO					10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Type O						10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Type OO							10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

5. Apparatus

5.1 Hardness measuring apparatus or durometer consisting of the following components:

5.1.1 *Presser Foot*, with a hole having a diameter as specified in Fig. 1(a), 1(b), or 1(c) with its center 6 mm (0.25 in.) from any edge of the foot.

5.1.2 *Indenter*, formed from hardened steel rod and shaped in accordance with Fig. 1(a), 1(b), or 1(c) with full extension adjustable between 2.46 to 2.54 mm (0.97 to 0.100 in.).

5.1.3 *Indenter Extension Indicating Device* (analog or electronic), having a scale reading from 0 to 100 with equal divisions throughout the range. The scale reading is an inverse function of the indenter extension. The device shall have a pointer that moves on the scale at a rate of one hardness point for each 0.025 mm (0.001 in.) of indenter movement.

NOTE 3—Type A Shore Durometers serial numbers 1 through 16 300 and 16 351 through 16 900 and Type A-2 Shore Durometers numbers 1 through 8077 do not meet the requirement of 2.46 to 2.54 mm (0.097 to 0.100 in.) extension of the indenter at zero reading. These durometers will give readings which are low by amounts ranging from 3 units at 30 hardness to 1 unit at 90 hardness.

5.1.4 *Timing Device* (optional), capable of being set to a desired elapsed time, signalling the operator or holding the hardness reading when the desired elapsed time has been reached. The timer should be automatically activated when the presser foot is in firm contact with the specimen being tested.

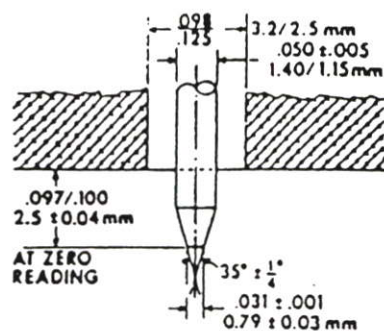
5.1.5 *Calibrated Spring*, for applying force to the indenter in accordance with Fig. 1.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-11 on Rubber and is the direct responsibility of Subcommittee D11.10 on Physical Tests. Current edition approved May 15, 1991. Published February 1992. Originally published as D 2240 - 64 T. Last previous edition D 2240 - 86.

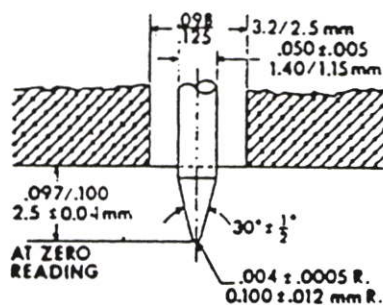
² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 09.01.

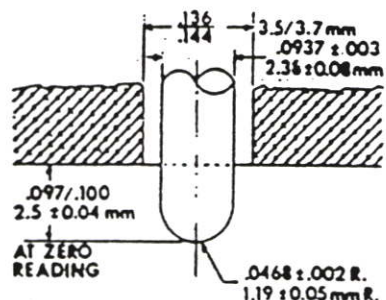
⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 09.02.



(a) Indenter for Type A and C Durometers



(b) Indenter for Type B and D Durometers



(c) Indenter for Type DO, O, and OO Durometers

NOTE—Spring Force Combinations:

$$\text{Force, } N = 0.550 + 0.075 H_x$$

where H_x = hardness reading on Type A, B and O durometers.

$$\text{Force, } N = 0.4445 H_y$$

where H_y = hardness reading on Type C, D and DO durometers.

$$\text{Force, } N = 0.203 + 0.00908 H_{\infty}$$

where H_{∞} = hardness reading on Type OO durometers.

FIG. 1 Durometer, Indenter and Spring Force Combinations

6. Test Specimen

6.1 The test specimen shall be at least 6 mm (0.25 in.) in thickness unless it is known that results equivalent to the 6 mm values are obtained with a thinner specimen (see Note 4). A specimen may be composed of plied pieces to obtain the necessary thickness, but determinations made on such specimens may not agree with those made on solid specimens because the surface faces between plies may not be in complete contact. The lateral dimensions of the specimen shall be sufficient to permit measurements at least 12 mm (0.5 in.) from any edge unless it is known that identical results are obtained when measurements are made at lesser distance from an edge. The surfaces of the specimen shall be flat and parallel over a sufficient area to permit the presser foot to contact the specimen over an area having a radius of

at least 6 mm (0.25 in.) from the indenter point. A suitable hardness determination cannot be made on a rounded, uneven, or rough surface.

NOTE 4—The minimum requirement for the thickness of the specimen is dependent on the extent of penetration of the indenter into the specimen; that is, thinner specimens may be used for materials having hardness values at the upper end of the scale. The minimum distance from the edge at which measurements may be made likewise decreases as the hardness increases. For materials having hardness values above 50 Type D durometer, the thickness of the specimen should be at least 3 mm (0.12 in.) and measurements should not be made closer than 6 mm (0.25 in.) to any edge.

7. Calibration

7.1 The durometer spring shall be calibrated by supporting the durometer in a vertical position and applying a measurable force to the indenter tip (see Fig. 2). The device used to apply the force may be a dead weight or electronic load cell device capable of measuring applied force at 50 % of the calibration tolerance. Care should be taken to ensure that the force is applied vertically to the indenter tip, as side loads will cause errors in calibration. Spring calibration shall be verified on all durometer at scale readings of 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90. The measured force ($9.8 \times$ mass in kilograms) shall be equivalent to the force calculated by the equation in Fig. 1. The measured force for Type A, B and O durometers shall be within ± 0.08 N. For Type C, D and DO durometers it shall be within ± 0.44 N, and for Type OO durometers it shall be within ± 0.025 N.

NOTE 5—Instruments specifically designed for the calibration of durometers may be used.⁵

7.2 Indenter extension and shape must be in accordance with 5.1.2. With the durometer placed firmly on a flat surface the indicator should read a number equal to the indenter extension measured in inches \times 1000, within ± 0.5 durometer points.

NOTE 6—When performing the procedure in 7.2 on Type B and D durometers care should be used not to damage the indenter tip.

7.3 Test blocks (rubber or spring type) provided for checking durometer operation are not to be relied upon as calibration standards. The calibration procedures outlined in 7.1 and 7.2 are the only valid calibration methods.

8. Conditioning

8.1 Tests shall be made at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). For materials whose hardness depends on relative humidity, the specimen shall be conditioned in accordance with Procedure A of Practice D 618 and tested under the same conditions.

NOTE 7—No conclusive evaluation has been made on durometers at temperatures other than $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). Conditioning at temperatures other than the above may show changes in calibration. Durometer use at temperatures other than the above should be decided locally (see Practice D 1349).

9. Procedure

9.1 Place the specimen on a hard, horizontal surface.

⁵ Zwick and Co., Control Equipment 7501 with serial numbers higher than WA 20301 or the Shore Durocalibrator, available from Shore Instrument Manufacturing Co., 80 Commercial St., Freeport, NY 11520, have been found satisfactory for this purpose.

Hold the durometer in a vertical position with the point of the indenter at least 12 mm (0.5 in.) from any edge of the specimen, unless it is known that identical results are obtained when measurements are made with the indenter at a lesser distance. Apply the presser foot to the specimen as rapidly as possible, without shock, keeping the foot parallel to the surface of the specimen. Apply just sufficient pressure to obtain firm contact between presser foot and specimen.

NOTE 8—Better repeatability may be obtained by using a mass centered on the axis of the indenter. Recommended masses are 1 kg for Type A, B and O durometers, 5 kg for Type C, D and DO durometers, and 400 g for Type OO durometers. Durometer stands using the masses above as a constant load and a controlled descent speed, without shock, produce maximum repeatability.

9.2 For any material covered in 1.1, after the presser foot is in firm contact with the specimen, the scale reading is to be taken within 1 s or after any period of time agreed upon between supplier and user unless the durometer has a maximum indicator, in which case the maximum reading is taken. The hardness reading may progressively decrease with time delay.

9.3 Make five measurements of hardness at different positions on the specimen at least 6 mm (0.25 in.) apart and determine the arithmetic mean.

NOTE 9—The type of durometer should be selected with the knowledge that readings below 10 or above 90 are not considered reliable by the manufacturer. It is suggested that readings in these ranges not be recorded.

10. Report

10.1 Report the following information:

- 10.1.1 Hardness value obtained,
- 10.1.2 Complete identification of the material tested,
- 10.1.3 Vulcanization date,
- 10.1.4 Description of specimen, including thickness and number of pieces plied, if less than 6 mm (0.25 in.),
- 10.1.5 Temperature of test if other than 23°C,
- 10.1.6 Relative humidity when hardness of material is dependent on humidity,
- 10.1.7 Type and serial number of durometer,
- 10.1.8 Indentation hardness time interval at which reading was taken, and
- 10.1.9 Date of test.

NOTE 10—Readings may be reported in the form: A/45/15 where A is the type of durometer, 45 the reading, and 15 the time in seconds that the pressure foot is in firm contact with the specimen. Similarly, D/60/1 indicates a reading of 60 on the Type D durometer obtained either within 1 s or from a maximum indicator.

11. Precision and Bias⁶

11.1 These precision and bias statements have been prepared in accordance with Practice D 4483. Refer to this Practice for terminology and other testing and statistical concepts.

11.2 The Type 1 precision for both Type A and D methods was determined from an interlaboratory program with three materials of varying hardness, with six participating laboratories. Tests were conducted on two separate

TABLE 1 Type 1 Precision—Type A Durometer Method

Material	Average Level	Within Laboratories			Between Laboratories		
		Sr^A	r^B	$(r)^C$	SR^D	R^E	$(R)^F$
1	51.4	0.646	1.83	3.56	11.56	4.41	8.59
2	65.3	0.878	2.48	3.81	22.14	6.06	9.27
3	68.0	0.433	1.23	1.80	22.28	6.45	9.49
Pooled	61.6	0.677	1.92	3.11	22.02	5.72	9.28

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.

^B r = repeatability = $2.83 \times Sr$, measurement units.

^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).

^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.

^E R = reproducibility = $2.83 \times SR$, measurement units.

^F (R) = reproducibility, relative, (that is, in percent).

TABLE 2 Type 1 Precision—Type D Durometer Method

Material	Average Level	Within Laboratories			Between Laboratories		
		Sr^A	r^B	$(r)^C$	SR^D	R^E	$(R)^F$
1	42.6	0.316	0.894	2.10	2.82	7.98	18.7
2	54.5	0.791	2.24	4.11	3.54	10.0	18.4
3	82.3	1.01	2.86	3.47	3.54	10.0	12.2
Pooled	59.8	0.762	2.16	3.61	3.32	9.40	15.7

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.

^B r = repeatability = $2.83 \times Sr$, measurement units.

^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).

^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.

^E R = reproducibility = $2.83 \times SR$, measurement units.

^F (R) = reproducibility, relative, (that is, in percent).

days in each laboratory for both A and D testing programs. All materials were supplied from a single source.

11.3 A test result for hardness (both A and D) was the median of five individual hardness readings on each day in each laboratory.

11.4 Table 1 shows the precision results for Type A method. Table 2 gives the precision results for Type D method.

11.5 The precision results in this precision and bias section give an estimate of the precision of this test method with the materials (rubbers) used in the particular interlaboratory program as described above. The precision parameters should not be used for acceptance or rejection testing, or both, of any group of materials without documentation that they are applicable to those particular materials and the specific testing protocols that include this test method.

11.6 *Precision*—The precision of this test method may be expressed in the format of the following statements which use as appropriate value r , R , (r) or (R) , that is, that value to be used in decisions about test results (obtained with the test method). The appropriate value is that value of r or R associated with a mean level in Tables 1 and 2 closest to the mean level under consideration (at any given time, for any given material) in routine testing operations.

11.6.1 *Repeatability*—The repeatability, r , of this test method has been established as the appropriate value tabulated in Tables 1 and 2. Two single test results, obtained under normal test method procedures, that differ by more than this tabulated r (for any given level) must be considered as derived from different or nonidentical sample populations.

11.6.2 *Reproducibility*—The reproducibility, R , of this test method has been established as the appropriate value tabulated in Tables 1 and 2. Two single test results obtained

⁶ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D11-1029.

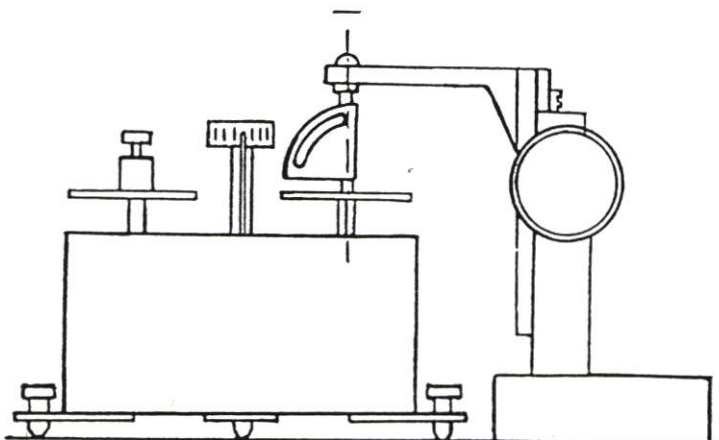
 D 2240


FIG. 2 Apparatus for Calibration of Durometer Spring

in two different laboratories, under normal test method procedures, that differ by more than the tabulated R (for any given level) must be considered to have come from different or nonidentical sample populations.

11.6.3 Repeatability and reproducibility expressed as a percentage of the mean level, (r) and (R), have equivalent application statements as above for r and R . For the (r) and (R) statements, the difference in the two single test results is

expressed as a percentage of the arithmetic mean of the two test results.

11.7 *Bias*—In test method terminology, bias is the difference between an average test value and the reference (or true) test property value. Reference values do not exist for this test method since the value (of the test property) is exclusively defined by this test method. Bias, therefore, cannot be determined.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) and Related Plastic Pipe and Fitting Compounds for Pressure Applications¹

This standard is issued under the fixed designation D 3915; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This specification covers plastic compounds composed of poly(vinyl chloride), chlorinated poly(vinyl chloride), or vinyl chloride copolymers, and the necessary compounding ingredients intended for use in making pipe, fittings, and other piping appurtenances. The compounding ingredients may consist of lubricants, stabilizers, nonpoly(vinyl chloride) resin modifiers, pigments, and inorganic fillers.

1.2 This specification is designed to cover compounds for pressure piping applications. Refer to Specification D 4396 for compounds designed for non-pressure applications.

1.3 Rigid PVC type compounds for building applications other than piping are covered in Specification D 4216.

1.4 Rigid PVC type compounds for general purpose extrusion and molding use are covered in Specification D 1784. Specification D 1784 is applicable to piping applications involving special chemical and acid resistance.

1.5 The requirements in this specification are intended for the quality control of compounds used to manufacture pipe and fittings. They are not applicable to finished pipe and fittings. See the applicable ASTM standards for requirements for finished products.

1.6 It may be necessary in special cases to select specific compounds for unusual piping applications that require consideration of other properties not covered in this specification, such as service temperature, sag resistance, chemical resistance, weather resistance, bending forces, etc.

1.7 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are given for information only.

1.8 The following safety hazards caveat pertains only to the test methods section, Section 11, of this specification: *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 256 Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials²

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing²

D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics²

D 648 Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 1243 Test Method for Dilute Solution Viscosity of Vinyl Chloride Polymers²

D 1784 Specification for Rigid Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Compounds and Chlorinated Poly(Vinyl Chloride) (CPVC) Compounds^{3,4}

D 1898 Practice for Sampling of Plastics⁴

D 2837 Test Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials³

D 3010 Practice for Preparing Compression-Molded Test Sample Plaques of Rigid Poly(Vinyl Chloride) Compounds⁴

D 4216 Specification for Rigid Poly(Vinyl Chloride) (PVC) and Related Plastic Building Products Compounds³

D 4396 Specification for Rigid Poly(Vinyl Chloride) (PVC) and Related Plastic Compounds for Non-Pressure Piping Products⁵

F 412 Terminology Relating to Plastic Piping Systems³

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *General*—Definitions used in this specification shall be in accordance with Terminology D 883 and Definitions F 412, unless otherwise noted. The following are the definitions of the kinds of plastics covered:

3.1.2 *chlorinated poly(vinyl chloride)* (CPVC)—a compound based on a polymer similar to PVC but with a significantly greater chlorine content.

3.1.3 *poly(vinyl chloride)* (PVC)—a compound based on a polymer (resin) prepared by the polymerization of vinyl chloride as essentially the sole monomer (vinyl chloride content not less than 97.0 %).

3.1.4 *PVC resins and PVC compounds*—as used in this specification, materials made from poly(vinyl chloride) or vinyl chloride copolymers.

3.1.5 *vinyl chloride copolymer*—a compound based on a polymer prepared by the copolymerization of vinyl chloride and other monomers, the vinyl chloride content being at least 80 mass %.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.15 on Thermoplastic Materials.

Current edition approved Nov. 24, 1989. Published February 1990. Originally published as D 3915 – 80. Last previous edition D 3915 – 80 (88)¹

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.04.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

D 3915

4. Classification

4.1 Means for classifying and identifying PVC pipe and fittings compounds are provided in Table 1. The properties enumerated in this table and the tests defined are expected to provide identification of the compounds selected. They are not necessarily suitable for direct application in design because of differences in shape of part, size, loading, environmental conditions, etc.

4.2 Classes are designated by the cell number for each property in the order in which they are listed in Table 1.

NOTE 1—The manner in which selected materials are identified by this classification system is illustrated by a Class 134524 PVC pipe compound having the following requirements (see Table 1):

Class	1	3	4	5	2	4
Identification:						
Poly(vinyl chloride)						
Property and Minimum Value:						
Impact strength (1.50 to 5.00 ft·lbf/in.)						
Tensile strength (7000 to 8000 psi)						
Modulus of elasticity in tension (400 000 to 480 000 psi)						
Deflection temperature under load (100 to 110°C)						
Hydrostatic design basis (4000 psi)						

NOTE 2—The cell-type format provides the means for classification and close characterization and specification of material properties, alone or in combination, for a broad range of materials. This type format, however, is subject to possible misapplication since unobtainable property combinations can be selected if the user is not familiar with commercially available materials. The manufacturer should be consulted.

5. Ordering Information

5.1 The purchase order, or inquiry for these materials, shall state the specification number and identify the class selected, for example D 3915, Class 134544.

5.2 Further definition, as may be required for the following, shall be on the basis of agreement between the purchaser and the seller:

- 5.2.1 Physical form and particle size (see 6.2 and 6.3),
- 5.2.2 Contamination level (see 6.5),
- 5.2.3 Color (see 6.4),
- 5.2.4 Other supplementary definition, if necessary, and
- 5.2.5 Inspection (see 12.1).

6. Materials and Manufacture

6.1 The inherent viscosity of the resin (polymer) used in pipe compounds meeting Cell 1 requirements in Designation Order No. 1 shall be not less than 0.88, when measured in accordance with Test Method D 1243 (see Table 1). The inherent viscosity of the resin (polymer) used in fitting compounds meeting Cell 1 requirements in Designation Order No. 1 shall be not less than 0.65, when measured in accordance with Test Method D 1243.

6.2 Materials supplied under this specification shall be PVC compound in the form of cubes, granules, free-flowing powder blends, or compacted powder blends.

6.3 Materials shall be of uniform composition and size as agreed upon between the purchaser and the seller.

6.4 Color and transparency or opacity of molded or

extruded articles formed under the conditions recommended by the seller shall be comparable within commercial match tolerances to the color and transparency or opacity of standard molded or extruded samples of the same thickness supplied in advance by the seller of the material.

6.5 Materials shall be free of foreign matter to a level that is not expected to affect serviceability adversely.

7. Physical Requirements

7.1 Test values for specimens of the material prepared as specified in Section 10 and tested in accordance with Section 11 shall conform to the requirements given in Table 1 for the class selected.

7.2 The compound shall be adequately stabilized.

NOTE 3—The type and amount of stabilizer may vary with the compound formulation, the equipment on which the compound is processed, the temperatures during processing steps, and the amount of regrind (reworked) material employed. No test procedure has been found to date that is suitable for use in specifications of this type. Research methods that vary among laboratories and that have not been amenable to standardization are used.

8. Sampling

8.1 A batch or lot shall be considered as a unit of manufacture and may consist of a blend of two or more production runs of material.

8.2 Unless otherwise agreed upon between the seller and the purchaser, the material shall be sampled in accordance with the procedure described in the General and Specific Sampling Procedures, as applicable, of Practice D 1898. Adequate statistical sampling prior to packaging shall be considered an acceptable alternative.

9. Testing

9.1 The requirements identified by the class designation and otherwise specified in the purchase order (see 5.1) shall be verified by tests made in accordance with the directions given in Section 11. For routine inspection, only those tests necessary to identify the materials to the satisfaction of the purchaser shall be required. One sample shall be sufficient for testing each batch or lot provided that the average values for all of the tests made on that batch or lot comply with the specified requirements.

9.2 If any failure occurs, the materials may be retested in accordance with agreement between purchaser and the seller (see 12.1).

10. Specimen Preparation

10.1 Compliance with the designated requirements chosen from Table 1 shall be determined with the compression-molded, extruded, or injection-molded test specimens for impact resistance, tensile strength, tensile modulus of elasticity, and deflection under load. Specimens cut from extruded pipe samples shall be used for hydrostatic design basis tests. Procedures used in preparing the test specimens shall be as recommended by the seller. The preparation of test specimens shall be the same for all tests other than hydrostatic design basis required by Section 11. Test specimens shall conform to the requirements prescribed in Section 11. In cases of disagreement, the referee method shall be Practice D 3010 with complete fusion demonstrated by lack of fraying or delamination of specimens during testing.

 D 3915

TABLE 1 Class Requirements for Poly(Vinyl Chloride) and Related Plastic Pipe and Fitting Compounds

NOTE—The minimum property value will determine the cell number although the maximum expected value may fall within the next higher cell.

Designation Order No.	Property and Unit	Cell Limits								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
1	Kind of resin in compound	unspecified	poly(vinyl chloride) (PVC)	chlorinated poly(vinyl chloride) (CPVC)	vinyl chloride copolymer (CVC)					
2	Impact resistance: J per standard specimen ft.-lbf/in. of notch	unspecified	<40.0 <0.65	40.0 to <80.1 0.65 to <1.50	80.1 to <266.9 1.50 to <5.00	266.9 or greater 5.00 or greater				
3	Tensile strength: MPa psi	unspecified	<34.0 <5000	34.0 to <41.0 5000 to <6000	41.0 to <48.0 6000 to <7000	48.0 to <55.0 7000 to <8000	55.0 or greater 6000 or greater			
4	Modulus of elasticity in tension: MPa psi	unspecified	<1930 <280 000	1930 to <2210 280 000 to <320 000	2210 to <2480 320 000 to <360 000	2480 to <2760 360 000 to <400 000	2760 to <3310 400 000 to <480 000	3310 to <3860 480 000 to <560 000	3860 or greater 560 000 or greater	
5	Deflection temperature under load, 1.82 MPa (264 psi) °C °F	unspecified	60 to <70 140 to <158	70 to <80 158 to <176	80 to <100 176 to <212	100 to <110 212 to <230	110 or greater 230 or greater			
6	Hydrostatic design basis: MPa psi	unspecified	13.80 (13.25 to 16.50) 2000 (1920 to 2390)	17.25 (16.55 to 20.75) 2500 (2400 to 3010)	21.70 (20.80 to 26.35) 3150 (3020 to 3820)	27.60 (20.40 to 33.05) 4000 (3830 to 4790)	34.50 (33.10 to 41.60) 5000 (4800 to 6030)			

11. Test Methods

11.1 *Conditioning*—Condition the test specimen for deflection temperature (Test Method D 648) in accordance with Procedure B of Practice D 618, except that the minimum conditioning time shall be 24 h. Condition all other test specimens in accordance with Procedure A of Practice D 618. The minimum conditioning time shall be 24 h.

11.2 *Test Conditions*—Unless otherwise specified in the testing methods or in this specification, conduct tests in the Standard Laboratory Atmosphere of $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1.8^\circ\text{F}$ ($\pm 1^\circ\text{C}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

11.3 *Tensile Strength and Modulus of Elasticity*—Test Method D 638, using Type I specimens.

NOTE 4—Current industrial practice uses a specimen thickness of 0.13 ± 0.02 in. (3.2 ± 4 mm) and a speed of testing of 0.20 in. (5 mm)/min $\pm 25\%$.

11.4 *Deflection Temperature*—Test Method D 648 using $\frac{1}{2} \times \frac{1}{8}$ in. (12.5×3.2 mm) specimens under 264 psi (182 mPa) load.

NOTE 5—Data are requested on Vicat softening point (VSP), so that in a future revision requirements for this property can be added or substituted for the deflection temperature under load. VSP is widely used with success in Europe.

11.5 *Hydrostatic Design Basis*—Test Method D 2837.

11.6 *Impact Resistance (Izod)*—Method A of Test Method D 256, using 0.25 in. (6.35) thick specimens. The specimens may be compression-molded or injection-molded with the provision that compression-molded specimens built up as laminates in which complete fusion is obtained shall be acceptable. Complete fusion means there shall be no evidence of fraying or delamination at the break.

12. Inspection

12.1 Inspection of the material shall be made as agreed upon between the purchaser and the seller as part of the purchase contract.

13. Packaging and Package Marking

13.1 *Packaging*—The material shall be packaged in standard commercial containers, so constructed as to ensure acceptance by common or other carriers for safe transportation at the lowest rate to the point of delivery, unless otherwise specified in the contract or order.

13.2 *Package Marking*—If agreed upon between the pur-



chaser and the seller, shipping containers shall be marked with the name of the materials, the name of the manufacturer, class, batch or lot number, quantity contained therein

as defined by the contract or order under which shipment is made, the name of the seller, and the number of the contract or order.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

INTERNATIONAL STANDARD

ISO 9261

First edition
1991-12-01

Agricultural irrigation equipment — Emitting-pipe systems — Specification and test methods

*Matériel agricole d'irrigation — Gaines de micro-irrigation —
Spécifications et méthodes d'essai*

TISI Library
ห้องสมุด TISI

S031778



ISO 9261 1991

Thai Industrial Standards Institute : TISI
Rama VI Rd., Rajathevee Bangkok 10400 Tel : 202-3510



Reference number
ISO 9261:1991(E)

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

International Standard ISO 9261 was prepared by Technical Committee ISO/TC 23, *Tractors and machinery for agriculture and forestry*, Subcommittee SC 18, *Irrigation and drainage equipment and systems*.

© ISO 1991

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland
Printed in Switzerland



Agricultural irrigation equipment — Emitting-pipe systems — Specification and test methods

1 Scope

This International Standard specifies mechanical and functional requirements of agricultural irrigation emitting-pipes and their fittings, test methods and the data to be supplied by the manufacturer to permit correct installation and operation in the field.

It applies to dripping and trickling pipes, hoses and tubing intended for irrigation, of which the emitting units form an integral part. It also applies to the fittings used for connecting these emitting-pipes, hoses and tubing; it does not apply to porous pipe (porous along its entire length).

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards

ISO 3501:1976, *Assembled joints between fittings and polyethylene (PE) pressure pipes — Test of resistance to pull out.*

ISO 8796:1989, *Polyethylene (PE) 25 pipes for irrigation laterals — Susceptibility to environmental stress-cracking induced by insert-type fittings — Test method and specification.*

3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

3.1 emitting-pipe: Continuous pipe, hose or tubing with perforations or other hydraulic devices formed

in the pipe during production and intended to emit water in the form of drops or continuous flow, at emission rates not exceeding 15 l/h per emitting unit.

3.2 regulated [pressure-compensating] emitting-pipe: Emitting-pipe of relatively constant emission rate at varying water pressures at the emitting-pipe inlet within the limits specified by the manufacturer.

3.3 unregulated emitting-pipe: Emitting-pipe whose emission rate varies at different water pressures.

3.4 non-reusable emitting-pipe: Light-weight emitting-pipe not intended for removal and reinstallation.

3.5 reusable emitting-pipe: Heavy-weight emitting-pipe which is designed for removal and reinstallation with proper handling from one season to another or under other circumstances.

3.6 emitting unit: Section of the emitting-pipe, repeated at intervals, from which water is emitted to one clearly distinguishable location.

3.7 unit emitting-pipe: Length of emitting-pipe containing one emitting unit.

3.8 clamping band: Ring- or band-like device used for obtaining a water-tight joint between emitting-pipe and fitting.

3.9 fitting: Any connecting device suitable for attachment to the emitting-pipe with or without a clamping band.

3.10 inlet fitting: Fitting having one end suitable for connection to a standard irrigation pipe or appliance and the other end or ends suitable for connection to an emitting-pipe.

3.11 in-line fitting: Fitting with both ends suitable for connection to an emitting-pipe.

3.12 nominal diameter: Conventional numerical designation used to indicate the size of the emitting-pipe and approximately equal to the outside diameter, in millimetres, of the pipe.

3.13 nominal test pressure, p_n : Reference pressure of 100 kPa at the inlet of an unregulated emitting unit; or any other pressure so designated in manufacturer publications.

3.14 nominal emission rate, q_n :

(1) Unregulated [non-compensating] emitting-pipe: Emission rate, in litres per hour, of the emitting unit at nominal test pressure and at a water temperature of 23 °C, as specified by the manufacturer.

(2) Regulated [pressure-compensating] emitting-pipe: Emission rate, in litres per hour, of the emitting unit at a water temperature of 23 °C, as specified by the manufacturer.

3.15 range of working pressures: Range of water pressures at the inlet of the emitting unit, between and including the minimum working pressure, p_{min} , and the maximum working pressure, p_{max} , recommended by the emitting-pipe manufacturer to ensure proper operation.

3.16 range of regulation: Range of water pressures at the inlet of the regulated emitting unit, in which each emitting unit of the emitting-pipe discharges water within the range of emission rates specified by the manufacturer.

4 Classification

Emitting-pipes are classified according to three criteria (see 4.1 to 4.3).

4.1 Uniformity of emission rate and regulation

Two categories of uniformity are classified:

- a) Uniformity category A: Emitting-pipes having higher uniformity of emission rates and smaller deviations from the specified nominal emission rate.
- b) Uniformity category B: Emitting-pipes having lower uniformity of emission rates and greater deviations from the specified nominal emission rate.

NOTE 1 The requirements for each category are defined in 9.1 and 9.2.

4.2 Duration of use

Two categories of duration of use are classified:

- a) non-reusable emitting-pipes;
- b) reusable emitting-pipes.

4.3 Type of operation

Two categories of type of operation are classified:

- a) unregulated emitting-pipes;
- b) regulated emitting-pipes.

5 Designation

Emitting-pipes shall be designated by

- a) the words "emitting-pipe";
- b) reference to this International Standard;
- c) the nominal diameter;
- d) nominal emission rate, in litres per hour;
- e) maximum working pressure, in multiples of 100 kPa units;
- f) the uniformity category.

EXAMPLE

An emitting-pipe complying with this International Standard, of 16 mm nominal diameter, 2 l/h emission rate, intended for operation at working pressures up to a maximum of 120 kPa and conforming to uniformity category A is designated as follows:

Emitting-pipe ISO 9261 16 - 2 - 1,2 - A

6 Marking

6.1 Emitting-pipe

Each emitting-pipe shall bear clear and permanent markings including the following details:

- a) name of manufacturer or his registered trademark;
- b) mark for identification of year of manufacture;
- c) designation according to clause 5;
- d) arrow indicating direction of flow (if it affects operation of the emitting-pipe).

These details shall be marked at intervals not exceeding 5 m.

6.2 Fittings

Emitting-pipe fittings shall bear clear and permanent markings including the following details:

Name of manufacturer or his registered trademark.

6.3 Packaging of emitting pipes

When the emitting-pipes are supplied in coils, each coil shall carry an attached tag bearing the following clear, legible and permanent information:

- a) name and address of manufacturer;
- b) designation and catalogue number of emitting-pipe;
- c) nominal diameter of emitting-pipe;
- d) classification according to 4.1, 4.2 and 4.3;
- e) length of emitting-pipe in coil;
- f) year of production and manufacturing lot;
- g) nominal emission rate of unit emitting-pipe and nominal pressure;
- h) spacing of emitting units.

6.4 Packaging of fittings

Fittings shall be supplied in package form, each bearing the following clear, legible and permanent information:

- a) name and address of manufacturer;
- b) catalogue number of fitting;
- c) nominal diameter of emitting-pipe and, if applicable, nominal diameter of the irrigation lateral or the nominal size of the thread;
- d) year of production and manufacturing lot.

7 Construction and materials

7.1 General

The emitting-pipe, its parts and fittings shall have no manufacturing defects that may impair performance.

The construction of the emitting-pipe and its fittings shall permit their easy connection, with or without

clamping bands, whether the connection is made manually or by means of suitable tools supplied by the manufacturer.

7.2 Dimensions

7.2.1 The manufacturer shall specify the inside diameter and wall thickness of the product, and the actual dimensions of the product shall comply with those declared by the manufacturer as stipulated in 9.3.

7.2.2 The dimensions of the connecting fittings shall fit the dimensions of the emitting-pipe, to ensure easy and reliable connection.

7.2.3 Emitting-pipes of the same class but of different inside diameter, made by the same manufacturer, with differences of diameter greater than 2 mm, shall be designated as different sizes.

7.3 Materials

The material used in the manufacture of emitting-pipes and their fittings shall be resistant to fertilizers and chemicals commonly employed in irrigation, and shall be suitable for use with water at temperatures up to 60 °C and at pressures designated for the emitting-pipe.

The materials shall, insofar as possible, not support the growth of algae and bacteria. The parts of the emitting-pipe that are exposed to light shall be opaque and protected against UV degradation.

7.4 Fittings

The manufacturer shall supply, for each type and size of emitting-pipe, fittings suitable in size and shape to make good connections to the emitting-pipe.

The jointing, made with or without the use of clamping bands, shall be of sufficient strength to withstand the full range of working pressures.

Clamping means, such as bands and screws, shall be of non-corroding materials or of materials protected against corrosion.

8 Test specimens and conditions

8.1 Test specimens

The sample shall be taken at random by a representative of the test laboratory from a lot of at least 500 emitting units. The test specimen shall not be taken from adjacent sections of the pipe. The test specimen shall include a minimum of five adjacent emitting units and the total number of test specimens shall contain at least 25 emitting units. The

number of emitting units required for each test is indicated in the relevant clause.

8.2 Order of tests

The tests shall be conducted in the order listed in clause 9. All tests, beginning with 9.2, shall be conducted on specimens which were taken according to 9.1.

8.3 Test conditions

Unless otherwise specified in the relevant clause, all tests shall be carried out at ambient air temperature and at a water temperature of $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The water used shall be filtered through a filter with nominal aperture of $75\text{ }\mu\text{m}$ to $100\text{ }\mu\text{m}$ (160 mesh to 200 mesh), or as recommended by the manufacturer.

8.4 Accuracy of measuring devices

The water pressure shall be measured with an error not exceeding 2 % of the actual values.

During the test, the pressure shall not vary by more than 2 %.

The emission rate of the emitting-pipe shall be measured with an error not exceeding $\pm 2\%$ of the actual values.

9 Test methods and requirements

9.1 Uniformity of emission rate

9.1.1 General

This test applies to regulated and unregulated emitting-pipes. The test sample shall include at least 25 emitting units in accordance with the requirement in 8.1.

9.1.2 Unregulated emitting-pipes

Measure the emission rates of the emitting units in the emitting-pipe when the water pressure at the inlets of the emitting units equals the nominal test pressure. Record separately the measured emission rate of each emitting outlet.

Calculate the coefficient of variation, C_v , from the following formula:

$$C_v = \frac{s_q}{\bar{q}} \times 100$$

where

s_q is the standard deviation of the emission rates for the sample;

\bar{q} is the mean emission rate of the sample.

The following requirements shall be met:

- The mean emission rate of the test sample shall not deviate from the nominal emission rate, q_n , by more than 5 % for category A, nor more than 10 % for category B.
- The coefficient of variation, C_v , of the emission rate of the test sample shall not exceed 5 % for category A, nor 10 % for category B.

9.1.3 Regulated emitting-pipes

Condition the emitting units in the test sample by operating them for 1 h minimum at an emitting unit inlet pressure equal to the pressure at the middle of the working pressure range. At the beginning of conditioning, the emitting units shall be operated three times at about p_{max} and three times at about p_{min} , each operation to be maintained for at least 3 min. During the last 10 min of conditioning, the pressure shall be maintained at the midpoint of the range of regulation.

Immediately after, and without altering the inlet pressure, test the emitting units according to 9.1.2, but at the mid-point of the range of regulation.

The emitting units shall comply with the requirements of 9.1.2.

9.2 Emission rate of emitting unit as function of inlet pressure

The tests to be performed to determine emission rate as a function of pressure shall be made in continuation of the tests performed in accordance with 9.1.2.

9.2.1 Selection of test samples

Number the emitting units tested according to 9.1, in ascending order according to the measured emission rate, No. 1 being the emitting unit of lowest emission rate, No. 25 the highest.

Take four emitting units from the series obtained — Nos. 3, 12, 13, 23 — and measure their change in emission rate as a function of the inlet pressure.

Test each emitting unit in steps not greater than 50 kPa, from zero pressure up to $1,2 p_{\text{max}}$. Regulated emitting units shall be tested at three or more different pressures within the range of regulation, at rising and falling inlet pressures. The reading of the results shall be taken at least 3 min after reaching the test pressure.

If the inlet pressure exceeds the desired pressure by more than 10 kPa during its rise and fall, return to zero pressure and repeat the test.

9.2.2 Unregulated emitting-pipe

Calculate, for each pressure level, the average emission rate, \bar{q} , obtained by measuring the emission rates of the four emitting units at rising pressure.

Plot the curve \bar{q} as a function of inlet pressure.

The curve of \bar{q} shall conform to the curve presented in manufacturer publications within an allowable deviation of not more than $\pm 5\%$ for category A, not more than $\pm 10\%$ for category B.

9.2.3 Regulated emitting-pipe

Calculate, for each inlet pressure level, p , the average emission rate, \bar{q} , obtained by measuring the emission rates of the four emitting units at rising and falling pressure (the average of eight emission rate measurements).

The value of \bar{q} shall not deviate from the nominal emission rate by more than 5% for category A, nor more than 10% for category B.

9.3 Dimensions

9.3.1 Wall thickness of emitting-pipe

Measure the wall thickness of the emitting-pipe at four points equally spaced on the periphery of the pipe. Repeat the test at two cross-sections. In the event of a part of the pipe wall being thicker by design (e.g. flap in emitting-pipe), such increase in thickness is disregarded.

The wall thickness of the emitting-pipe, when measured at each of the four points, shall not be less than 90% of the declared wall thickness.

9.3.2 Inside diameter of emitting-pipe

To measure the inside diameter of the emitting-pipe, insert a conical part (apex angle not greater than 10°) into the end of the emitting-pipe, taking care not to enlarge the pipe diameter. Mark on the cone the circle made by the end of the pipe and measure its diameter.

The measured inside diameter shall not deviate by more than $\pm 0,3$ mm from the declared diameter.

9.3.3 Flow paths in emitting unit

Measure, in at least three emitting units, accurately to the nearest $0,02$ mm and under no pressure, the smallest dimension of the flow-path. (This does not apply to a dimension that varies with pressure.)

The smallest measured flow-path dimension shall not be smaller than the dimension declared by the manufacturer.

9.3.4 Spacing of emitting units

Measure three spacings of emitting units accurately to the nearest $1,0$ mm.

The spacings of the emitting units shall not deviate by more than 5% from the spacings declared by the manufacturer.

9.4 Resistance to hydrostatic pressure

9.4.1 Resistance to hydrostatic pressure at ambient temperature

Carry out the test on a length of emitting-pipe consisting of five unit emitting-pipes joined by means of in-line fittings.

Carry out the test in two stages (9.4.1.1 and 9.4.1.2).

9.4.1.1 Connect the emitting-pipe assembly to a source of water, by means of an inlet fitting, and close its outlet end. Fill the emitting-pipe assembly with water and check that no air remains trapped in the pipe. Increase the water pressure gradually (10 s minimum) to the maximum working pressure multiplied by $1,2$ for non-reusable emitting-pipes, or to the maximum working pressure multiplied by $1,8$ for reusable emitting-pipes, and maintain the test pressure for 1 h.

The emitting-pipe assembly shall withstand the test pressure without showing signs of damage to the emitting-pipe, the emitting units or the connecting fittings. The unit emitting-pipes shall not pull apart, and no leakage shall occur at the inlet fitting. Leakages not exceeding the emission rate on one emitting unit are permissible at in-line fittings.

9.4.1.2 Reduce the test pressure to nominal pressure and maintain for at least 3 min. Measure the flow-rate of each emitting unit.

The flow-rate of each emitting unit shall not deviate by more than 10% from its original flow-rate as measured in 9.1.

9.4.2 Resistance to hydrostatic pressure at elevated temperature

Carry out the test on a length of emitting-pipe consisting of three unit emitting-pipes joined by means of in-line fittings.

9.4.2.1 Connect the emitting-pipe assembly to a source of water by means of an inlet fitting, and close its outlet end. Fill the emitting-pipe assembly with water and check that no air remains trapped in the pipe. Raise the water pressure gradually (10 s minimum) to maximum pressure and maintain the pressure for 24 h for non-reusable emitting-pipes or

48 h for reusable emitting-pipes, while the emitting-pipe test assembly is immersed in water at $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature.

The emitting-pipe shall withstand the test pressure without showing signs of damage.

9.4.2.2 Remove the test assembly from the water and leave it for 30 min at ambient temperature. Apply a hydrostatic pressure, p_n , for at least 3 min at ambient temperature and measure the flow-rate of each emitting unit.

The flow-rate of each emitting unit shall not deviate by more than 10 % from its original flow-rate, as measured in 9.1.

9.5 Resistance to tension at elevated temperature

Carry out the test on five unit emitting-pipes at a temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

If the emitting-pipe is reusable, mark two lines, about 150 mm apart, on the unit emitting-pipe.

Fasten each unit emitting-pipe in the grips of a tension-testing machine and uniformly increase (within 20 s to 30 s) the pull on the unit emitting-pipe to

- 160 N for non-reusable emitting-pipes [see 4.1 a)];
- 180 N for reusable emitting-pipes [see 4.1 b)].

Maintain the pull for 15 min, then release the pull and allow the unit pipe to cool to ambient temperature.

Non-reusable emitting-pipes shall withstand the test pull without breaking or tearing.

Reusable emitting-pipes shall withstand the test pull without breaking or tearing, the nominal flow-rate in the test specimen shall not vary by more than $\pm 5\%$ from the flow-rate measured before testing, and the distance between the two marked lines shall not vary by more than 5 % from the distance measured according to 9.1.

9.6 Resistance to pull-out of joints between fittings and reusable emitting-pipes

The test method and the test equipment used shall be as specified in ISO 3501, but the test pull shall be 180 N, applied for 1 h.

The fitting shall not pull out from the emitting-pipe.

9.7 Resistance of polyethylene (PE) emitting-pipe to environmental stress-cracking

The test and requirements shall be as specified in ISO 8796.

9.8 Determination of emitting unit exponent

This determination applies only to regulated emitting units.

The relation between the emission rate, q , in litres per hour, and the inlet pressure in an emitting unit, p , in kilopascals, is given by the formula:

$$q \simeq k \times p^m$$

where

k is a constant;

m is the emitting unit exponent.

Using all the \bar{q} and p values obtained in 9.2.3, calculate the emitting exponent, m , from the following formula:

$$m = \frac{\sum (\lg p_i)(\lg \bar{q}_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg p_i \right) \left(\sum \lg \bar{q}_i \right)}{\sum (\lg p_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum \lg p_i \right)^2}$$

where

i is 1, 2, 3, ..., n ;

n is the number of pressure values used in 9.2.3;

\bar{q} is the mean emission rate, in litres per hour;

p is the inlet pressure, in kilopascals.

The value of the emitting unit exponent, m , shall not exceed 0.2.

10 Data supplied by manufacturer

The manufacturer shall make available to the user, together with the pipe end fittings, catalogues or information sheets that include the following data:

- a) catalogue number of emitting-pipe and fitting;
- b) type of fittings for connecting emitting-pipe to supply network or appliances;
- c) instruction sheets for proper operation of emitting-pipe. The instruction sheets shall be dated;
- d) the words "Uniformity category A" or "Uniformity category B", as applicable, including the relevant values given in table 1;

- e) details of suitable fittings (including code number as marked on the fitting) for different applications;
- f) installation instructions for the emitting-pipe and fittings;
- g) nominal emission rate of unit emitting-pipe;
- h) inside diameter of emitting-pipe;
- i) wall thickness of emitting-pipe;
- j) range of working pressures of emitting-pipe;
- k) classification of emitting-pipe;
- l) operating characteristics of emitting-pipe (see 9.2);
- m) limitations of emitting-pipe use (fertilizers, chemicals, etc.);
- n) range of regulation (if any);
- o) filtration requirements;
- p) spacing of emitting units in emitting-pipe;
- q) minimum recommended radius for coiling emitting-pipe;
- r) maintenance and storage requirements;
- s) nominal test pressure;
- t) dimension of smallest flow path in emitting unit.

Table 1 — Uniformity values (according to 9.1)

Category	Parameter	
	Deviation of \bar{q} from q_n max. %	Coefficient of variation, C_v max. %
A	± 5	± 5
B	± 10	± 10

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวกัญญาณี แสงเกียรติยุทธ
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 25 ตุลาคม 2519
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2542
ผลงานทางวิชาการ	<ol style="list-style-type: none"> 1) “การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติกกราฟ.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2541. 2) “การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมระหว่างผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับพอลิไวนิลคลอไรด์เพื่อการผลิตท่อน้ำดื่ม.” วิศวกรรมสารมก., ฉบับที่ 44, สิงหาคม-พฤศจิกายน. 2544. หน้า 81-89.