นิพนธ์ต้นฉบับ

ผลกระทบของปริมาณพีวีซีที่ใช้แล้วและอุณหภูมิการผสมที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์พีวีซีโฟม

ศิรินทร ทองแสง[1] สืบพงษ์ สุวพนาวิวัฒน์[2] จักรพล สุพรรณเภสัช[2]
สุทิน จันทวาศ[2] กฤษดา คำพันธ์[2] และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[3]

Abstract

Thongsang, S.[1], Suwapanaviwat, S.[2], Supanpesat, J.[2], Chantawart, S.[2], Khamphan, K.[1] and Sombatsompop, N.[2]

Effects of recycled PVC content and processing temperature on the properties of PVC foam products

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27(3) : 575-589

This work used different types of recycled PVC products including PVC pipes and bottles, as rigid recyclates, and PVC plastic coverings, as soft recyclate. The PVC recyclates were added into virgin PVC foam, ranging from 0-100wt%. The PVC blends were then moulded with different processing temperatures, and their properties were monitored. It was found that the concentration of the pipe recyclates up to 60 wt% could be used to add into the PVC virgin for production of rigid PVC foam products. The higher the recyclate content led to the higher the blend density and the mechanical properties (flexural and impact strength,

[1]Department of Tools and Material Engineering, Faculty of Engineering [2]Division of Materials Technology, Faculty of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thung Khru, Bangkok, 10140 Thailand.

[1]M.Eng.(Material Technology), [2]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ [3]Ph.D.(Polymer Processing and Rheology), รองศาสตราจารย์, สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail: sirinthorn.tho@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 16 กรกฎาคม 2547 รับลงพิมพ์ 27 กันยายน 2547

and hardness). For bottle recyclates, up to 60 wt% of bottle recyclates could be used for rigid PVC foam production, but the overall properties, except for the impact strength, of the PVC foam did not improve with increasing the recycled bottles. For recycled coverings, increasing plastic coverings led to an increase in average cell size, but resulted in decreases of impact and hardness resistances. The flexible or soft PVC foam products could be manufactured with use of 0-100wt% recycled coverings. In summary, it could be concluded that recyclates of pipes, bottles and plastic coverings can be mixed with virgin PVC foam for making foam products.

Key words : recycled PVC, rigid PVC foam, soft PVC foam, pipe, bottle, plastic covering

บทคัดย่อ

ศิรินทร ทองแสง สืบพงษ์ สุวพนาวิวัฒน์ จักรพล สุพรรณเภสัช
สุทิน จันทวาศ กฤษดา คำพันธ์ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ผลกระทบของปริมาณพีวีซีที่ใช้แล้วและอุณหภูมิการผสมที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์พีวีซีโฟม

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(3) : 575-589

งานวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุพีวีซีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (recycled PVC) กลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ โดยนำทั้งพีวีซีชนิดแข็งคือ ท่อร้อยสายไฟและขวดแชมพู และพีวีซีชนิดอ่อนคือ ปกพลาสติก เติมลงในพีวีซีโฟมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 0-100% โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิการผสมต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมได้จริงในเบื้องต้น จากนั้นนำพีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบสมบัติทางกล ทางกายภาพ ตลอดจนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค สำหรับการนำท่อร้อยสายไฟขึ้นรูปเป็นพีวีซีโฟมแข็งเกร็ง (rigid PVC foam) พบว่าสามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีการเติมท่อร้อยสายไฟได้ในช่วง 0-60% โดยน้ำหนัก การเติมท่อร้อยสายไฟในปริมาณที่มากขึ้นนั้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความทนแรงกระแทก ทนแรงดัด และความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย การนำขวดแชมพูขึ้นรูปเป็นโฟมแข็งเกร็ง พบว่าสามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีการเติมขวดแชมพูได้ในช่วง 0-60% โดยน้ำหนัก การเติมขวดแชมพูในปริมาณมากขึ้นจะไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล ยกเว้นความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นและความแข็งลดลงเล็กน้อย ส่วนด้านการนำปกพลาสติกขึ้นรูปเป็นโฟมอ่อน (soft PVC foam) พบว่าสามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีการเติมปกพลาสติกได้ในช่วง 0-100% โดยน้ำหนัก โดยการเติมปกพลาสติกในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยใหญ่ขึ้นและส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความทนแรงดึงและความแข็งลดลงด้วย จากผลการวิจัยนี้สรุปได้ว่า สามารถนำวัสดุพีวีซีที่ใช้งานแล้วกลับมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์โฟมได้

พีวีซีเป็นพลาสติกที่สามารถเลือกขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ในหลายๆ แบบ ไม่ว่าจะเป็นพีวีซีชนิดแข็งเกร็งหรืออ่อน รวมถึงการผลิตเป็นพีวีซีโฟมด้วยการทำให้เป็นรูพรุนเล็กๆ (microcellular) อยู่ภายในเนื้อพีวีซีและทำให้มีสมบัติเป็นโฟมแข็งเกร็ง (rigid foam) ซึ่งเป็นการพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการนำไปใช้งานหลายด้านมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์งานเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคารบ้านเรือน เช่น กรอบประตู หน้าต่าง เป็นต้น ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบา ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งอีกทั้งราคาของผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีปริมาณการนำพีวีซีมาใช้กันมาก และย่อมส่งผลต่อปัญหาการกำจัดขยะหรือของเสียพีวีซีตามมา จากการกำจัดของเสียด้วยวิธีการเผาและฝังกลบนั้นทำให้เกิดมลพิษและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้ในหลายๆ ประเทศเริ่มมีการแก้ไขปัญหาการกำจัดของเสียพีวีซีด้วยการนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่

อย่างไรก็ตาม การนำพีวีซีกลับมาใช้ใหม่โดยปกติมักประสบปัญหาเกี่ยวกับความไม่เสถียรต่อความร้อนของ

พีวีซี กล่าวคือ หากนำพีวีซีเก่ามาทำการผลิตหรือขึ้นรูปซ้ำอีก อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติไม่ดีพอ อีกทั้งลักษณะภายนอกจะเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์จากสีปกติไปเป็นสีเหลืองไหม้ ลักษณะเช่นนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า Dehydrohalogenation ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกมา และปัญหาอีกอย่างที่ทำให้กระบวนการนำพีวีซีกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่เป็นไปด้วยความยากลำบากคือ การสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเติมแต่งอื่นๆ

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตพีวีซีโฟมมีทั้งที่ศึกษาทางด้านกระบวนการผลิต สมบัติของพีวีซีโฟม และการผลิตพีวีซีโฟมจากพีวีซีที่ใช้แล้ว อาทิ Thomas และ Quirk (1995) ได้ทำการศึกษาการนำขวดพีวีซีกลับมาผลิตเป็นโฟมแข็งเกร็ง โดยการนำมาผสมกับพีวีซีโฟมบริสุทธิ์ พบว่า การเติมขวดพีวีซีมากขึ้นทำให้รูปร่างของเซลล์โฟมหยาบกว่าพีวีซีบริสุทธิ์ ซึ่งมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลม ซึ่งอาจเป็นผลจากความสามารถของการอัดตัวและการไหลขณะผสมที่ไหลยากขึ้น แต่ความหนาแน่นของโฟมยังคงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อนำไปทดสอบความทนแรงกระแทก พบว่าพลังงานที่ทำให้ผิวเสียหายไม่เปลี่ยนแปลงนัก อีกทั้งขนาด รูปร่างและการกระจายของเซลล์เล็กๆ ที่ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย Sombatsompop และ Thongsang (2001) และ ศิรินทร และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการผสมท่อน้ำพีวีซีที่ใช้แล้วลงในพีวีซีบริสุทธิ์เกรดรีดท่อและเกรดเป่าขวด ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจาก 0-80% โดยน้ำหนัก พบว่าท่อน้ำพีวีซีที่ใช้แล้วที่ถูกเติมลงในพีวีซีบริสุทธิ์ทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลง และปริมาณการพองฟูไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดการหลอมตัวของอนุภาคของพีวีซี สำหรับส่วนผสมที่มีปริมาณท่อน้ำพีวีซีที่ใช้แล้วเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่น และความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิสลายตัว อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิอ่อนตัวเพิ่มสูงขึ้น Laurent และคณะ (1997) ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการผลิตและรูปร่างเซลล์ของโฟมวัสดุผสมพีวีซีกับเส้นใยไม้ พบว่าการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะทำให้ความหนืดลดลง และเกิดปริมาณก๊าซมากขึ้น อีกทั้งการใช้สารบำบัดผิวเส้นใยไม้ช่วยในการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยไม้กับพีวีซีให้ดีขึ้นด้วย ซึ่งป้องกันการรั่วของก๊าซ ดังนั้นการเติมทั้งสารเพิ่มความยืดหยุ่นและสารบำบัดผิวเส้นใยไม้จึงทำให้วัสดุมีความเป็นเซลล์โฟมได้ดีขึ้นด้วย Weller และคณะ (1997) ศึกษาอิทธิพลสารเติมแต่งและความหนาแน่นของโฟมที่มีต่อสมบัติการทนแรงดึงของพีวีซีโฟม โดยการเตรียมวัตถุดิบที่ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบไปทำให้เกิดโฟมที่อิ่มตัวและมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ในช่วง 0.38-1 พบว่า เมื่อความหนาแน่นลดลง ทั้งความแกร่งและความแข็งแรงทางการดึงลดลงตามไปด้วย Patterson และคณะ (1997) ศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นโฟมที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพีวีซีโฟม ในแต่ละสูตรนั้นมีการใช้ปริมาณสารพองฟู สารช่วยในกระบวนการผลิต และอุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่างกัน เพื่อให้ได้พีวีซีโฟมในช่วงความหนาแน่นต่างๆ เมื่อความหนาแน่นลดลง สมบัติการทนแรงดึง การทนกระแทกและทนแรงดัดลดลงตามไปด้วย Rabinovitch และคณะ (1997) ศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะการผลิตของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปพีวีซีโฟมแข็งเกร็ง โดยการนำสูตรพีวีซีโฟมแข็งเกร็งมาเติมสารพองฟูแล้วผ่านกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวด้วยการใช้อุณหภูมิและความเร็วรอบในการผลิตต่างๆ กัน พบว่าในกระบวนการผลิตพีวีซีโฟมนั้นมีอุณหภูมิการผลิตที่เหมาะสมคือ 190-196ºC ซึ่งช่วงนี้ทำให้ได้พีวีซีโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ รูปร่างเซลล์สม่ำเสมอกัน ผิวภายนอกสวยงาม แต่เมื่อความเร็วรอบของสกรูสูง ทำให้รูปร่างเซลล์มีขนาดเล็กลง ความหนาแน่นสูง และผิวหยาบขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีเวลาในกระบวนการผลิตน้อย จึงมีโอกาสเกิดโฟมได้น้อยลง

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณพีวีซีที่ใช้แล้วและอุณหภูมิการผสมที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์พีวีซีโฟม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินความเป็นไปได้ของการผลิตพีวีซีโฟมจากวัสดุพีวีซีที่ใช้แล้ว และเป็นแนวทางในการเลือกอุณหภูมิการผสมที่เหมาะสมกับปริมาณการเติมพีวีซีที่สามารถผลิตพีวีซีโฟมได้รวมถึงสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์พีวีซีโฟมนั้นๆ

วิธีการทดลอง

1. พีวีซีโฟมแข็งเกร็ง

1.1 วัสดุที่ใช้

1) วัสดุพีวีซีที่ใช้แล้วคือ ท่อร้อยสายไฟ (Pipe: P) และขวดแชมพู (Bottle: B)

2) วัสดุสารประกอบพีวีซีบริสุทธิ์เกรดโฟมแข็งเกร็ง (Rigid Foam: RF) สารเติมแต่งที่ใช้เป็นเกรดการค้า โดยมีปริมาณส่วนประกอบดังรายละเอียดใน Table 1

1.2 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

เตรียมสารประกอบพีวีซีดัง Table 2 แล้วนำไปผสมแห้งด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูงของบริษัท Labtech Co., Ltd. (Thailand) เวลาในการผสม 2 นาที จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ รุ่น HAAKE PolyLab Rheomex CTW 100p ของบริษัท HAKKE Co.Ltd. (Germany) ซึ่งมีกำลังมอเตอร์ขนาด 10 กำลังแรงม้า สำหรับขับสกรูที่ใช้ผสมซึ่งมีขนาดสัดส่วนของช่วงป้อนเม็ดพลาสติกต่อช่วงปลายเป็น 31.3/20 มม. โดยพีวีซีหลอมถูกอัดรีดผ่านแม่พิมพ์อัดรีดรูปสี่เหลี่ยม (slit die) ขนาด 2.8×18 มม. โดยการใช้สภาวะการผลิตดัง Table 3 จากนั้นตัดชิ้นงานตามมาตรฐานต่างๆ ด้วยเครื่องกัด (milling)

1.3 การทดสอบอัตราการพองฟู

ในการทดสอบอัตราการพองฟู โดยการนำของผสมพีวีซีอัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมไว้มาอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นรูปร่างกลม (circular die) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. และใช้สภาวะการผลิตเหมือนกับการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบดังที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อวัดค่าอัตราการพองฟู ซึ่งคำนวณจากสมการ

Table 1. Compositions of vigin PVC compounds for rigid PVC foam.

Composition	content (phr)
1. PVC resin Suspension Type K58	100
2. Dibutyl Tin Maleate Compound	1
3. Acrylic Processing Aid	2
4. Calciam Stearate	1
5. Stearic Acid	0.5
6. PE Wax	1
7. White Oil	1
8. Blowing Agent (Azodicarbonamide)	1

Table 2. Sample code and ratio of PVC resin: recycled rigid PVC.

Sample code	PVC Resin (wt%)	Recycled Pipes (wt%)	Recycled Bottles (wt%)
RF100	100	-	-
RF+P20	80	20	-
RF+P40	60	40	-
RF+P60	40	60	-
RF+P80	20	80	-
RF+P100	-	100	-
RF+B20	80	-	20
RF+B40	60	-	40
RF+B60	40	-	60
RF+B80	20	-	80
RF+B100	-	-	100

Table 3. Processing condition of PVC foam extrusion.

Materials	Screw speed (rpm)	Temperature (ºC)			
		Zone 1 (near hopper)	Zone 2	Zone 3	Zone 4 (near die)
PVC resin + Recycled pipes	40	160	170	175	180 190 200
PVC resin + Recycled bottles	30	150	160	170	175 185 195

$$D_s = \frac{D_f}{D_d}$$

โดยที่ D_s คือ อัตราการฟองฟูของพีวีซีโฟม

D_f คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพีวีซีโฟมที่รีดออกมา

D_d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป

1.4 การทดสอบสมบัติด้านความหนาแน่น

ในการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นของพีวีซีโฟมนั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1622-93 ซึ่งใช้ตัวอย่างชิ้นงานจากการทดสอบอัตราการพองฟูที่มีลักษณะเป็นรูปร่างกลม

1.5 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการทนแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติการทนแรงดึง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ 1 โดยทดสอบด้วยการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ LLORD LR 50K (UK) และใช้ตัวจับยึด (grip) ขนาด 50 กิโลนิวตัน ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 25ºC ความเร็วในการดึง 50 มม./นาที

1.6 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการทนแรงดัด

ในการทดสอบสมบัติการทนแรงดัด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยทดสอบด้วยการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ LLORD LR 50K (UK) และมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 25ºC ความเร็วในการทดสอบ 1.5 มม./นาที

1.7 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการทนแรงกระแทก

ในการทดสอบสมบัติการทนแรงกระแทกนั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod โดยทดสอบด้วยเครื่อง Yasuda (Japan) และใช้ลูกตุ้ม (Pendulum) ที่มีขนาด 4 จูล

1.8 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการวัดค่าความแข็ง

ในการทดสอบวัดค่าความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Durometer สเกล shore D Model 475 ของบริษัท PTC instruments (USA) จำกัด

1.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคนั้นเป็นการศึกษารูปร่างลักษณะของโฟม รวมถึงการกระจายของโฟมที่เกิดขึ้นในพีวีซีโดยตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของบริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5800 Scanning Microscope (Japan) ด้วยกระแสไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

2. พีวีซีโฟมอ่อน

2.1 วัสดุที่ใช้

1) วัสดุพีวีซีที่ใช้แล้วคือ ปกพลาสติก (Plastic Covering: PC)

Table 4. Composition of vigin PVC compounds for soft PVC foam.

Composition	Content (phr)
1. PVC Emulsion	100
2. DOP	30
3. Epoxidized Soyabean Oil	7
4. Stabilizer	2.5
5. Chemical Blowing Agent	2

2) วัสดุสารประกอบพีวีซีบริสุทธิ์เกรดโฟมอ่อน (Soft Foam: SF) ซึ่งสารเติมแต่งที่ใช้เป็นเกรดการค้าทั่วไป โดยมีปริมาณส่วนประกอบดังรายละเอียดใน Table 4

2.2 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมเศษวัสดุพีวีซีจากปกพลาสติกทำได้โดยการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และเติมลงในสารประกอบพีวีซีบริสุทธิ์เกรดโฟมอ่อนในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงใน Table 5 แล้วนำไปผสมแห้งด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง เวลาในการผสม 2 นาที จากนั้นนำไปผสมบนเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 150ºC แล้วจึงขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (hot press) โดยใช้เวลาในการอัดขึ้นรูป 3 นาที ด้วยอุณหภูมิต่างๆ คือ 170, 180 และ 190ºC จากนั้นนำแผ่นโฟมอ่อนที่ได้ไปตัดชิ้นงานทดสอบด้วยแม่พิมพ์ตัดที่มีรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ

2.3 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการทนแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติการทนแรงดึง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ 4 โดยทดสอบด้วยการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ LLORD LR 50K (UK) และใช้ตัวจับยึด (grip) ขนาด 5 กิโลนิวตัน ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 25ºC ความเร็วในการดึง 50 มม./นาที

2.4 การทดสอบสมบัติทางกลด้านการวัดค่าความแข็ง

ในการทดสอบวัดค่าความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Durometer สเกล shore A Model 408 ของบริษัท PTC instruments จำกัด (USA)

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์

ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพนั้น ทดสอบโดยการนำพีวีซีโฟมที่ได้จากการเตรียมเป็นแผ่นไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง ZEISS Optical Microscope (Germany) เพื่อศึกษารูปร่างและขนาดลักษณะของโฟม

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

1. ผลการทดสอบสมบัติพีวีซีที่มีการเติมท่อร้อยสายไฟ

ผลการทดสอบการขึ้นรูปพีวีซีโฟมจากเครื่องอัดรีด

Table 5. Sample code and ratio of PVC resin: recycled soft PVC.

Sample code	PVC Resin (wt%)	Recycled Plastic Coverings (wt%)
SF100	100	-
SF+PC20	80	20
SF+PC40	60	40
SF+PC60	40	60
SF+PC80	20	80
SF+PC100	-	100

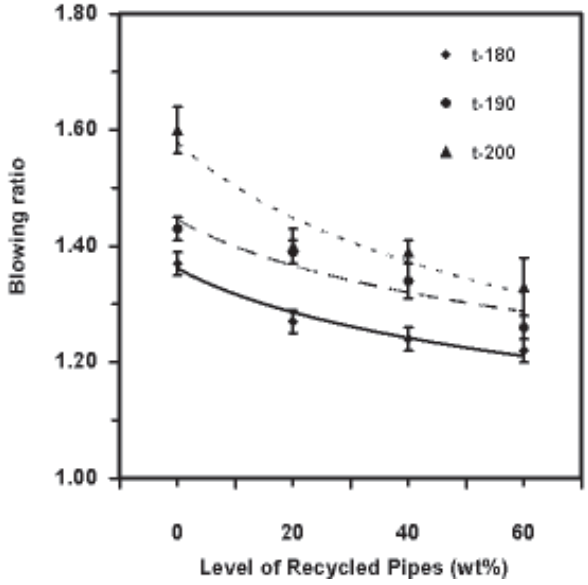

Figure 1. Blowing ratio vs level of recycled pipes of PVC foam at various processing temperatures.

เกลียวหนอนคู่ โดยทั่วไปการเกิดพีวีซีโฟมที่สมบูรณ์ได้นั้น พีวีซีต้องมีการหลอมตัวที่สมบูรณ์ด้วย ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญคือ อุณหภูมิการผสม แรงเฉือน และเวลาในการถ่ายเทความร้อนให้กระจายทั่วถึง จากการอัดรีดพีวีซีหลอมเหลวผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างกลม พบว่าสีของพีวีซีโฟมเปลี่ยนไปจากสีขาวเป็นสีเหลืองมากขึ้นตามปริมาณท่อร้อยสายไฟที่เติมลงไป ซึ่งสูตรที่มีการเติมท่อร้อยสายไฟ 0-60% โดยน้ำหนัก สามารถเกิดการหลอมตัวของพีวีซีที่สมบูรณ์และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานโฟมให้ลักษณะผิวที่ยอมรับได้ โดยสามารถขึ้นรูปได้ในช่วงอุณหภูมิการผสม 180-200ºC ที่ศึกษานี้ ส่วนสูตรที่มีการเติมท่อร้อยสายไฟ 80 และ 100% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถขึ้นรูปในสภาวะการผลิตที่ใช้ศึกษานี้ได้ เนื่องจากการเติมเศษท่อร้อยสายไฟลงไปมากขึ้นย่อมทำให้ของผสมนั้นอาศัยปัจจัยอื่นนอกจากอุณหภูมิการผสมที่ช่วยในการหลอมตัวของพีวีซีให้สมบูรณ์มากขึ้น เช่น แรงเฉือน และเวลาของการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคของพีวีซี ดังที่กล่าวข้างต้น เพราะท่อร้อยสายไฟนั้นได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาครั้งหนึ่งแล้ว ซึ่งมีความแข็งและการอัดแน่นของเนื้อพีวีซีสูงที่เป็นผลมาจากแรงเฉือนในกระบวนการขึ้นรูปท่อนั้น ดังแสดงในรายละเอียดในงานวิจัยของ Sombatsompop และ Thongsang (2001) และ ศิรินทร และคณะ (2544)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพองฟูของพีวีซีโฟมกับปริมาณท่อร้อยสายไฟที่ใช้แล้วดัง Figure 1 พบว่าเมื่อเติมปริมาณท่อร้อยสายไฟลงในพีวีซีโฟมบริสุทธิ์มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการพองฟูที่ลดลงเป็นลำดับ เนื่องจากของผสมมีความหนืดสูงขึ้น จากงานวิจัยของ Sombatsompop และ Thongsang (2001) และ ศิรินทร และคณะ (2544) ได้กล่าวถึงว่าท่อร้อยสายไฟที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วเกิดการหลอมตัวของพีวีซีมากขึ้น เมื่อนำมาผสมกับพีวีซีบริสุทธิ์ส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้สารตัวเติมก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความหนืดสูงขึ้นด้วย (ณรงค์ฤทธิ์, 2546) อาทิ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในพีวีซีเกรดท่อ (Titow, 1990) การที่พีวีซีมีความหนืดสูงนี้ทำให้การเกิดตำแหน่งนิวเคลียสของเซลล์โฟมขนาดเล็กๆ แทรกอยู่ในเนื้อพีวีซียากขึ้นด้วย ดัง Figure 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพีวีซีโฟมที่มีการเติมท่อร้อยสายไฟเพิ่มขึ้น จาก 0 20 40 60 %โดยน้ำหนัก ในรูป (a) (b) (c) และ (d) ตามลำดับ พบว่าเมื่อยังไม่มีการเติมท่อร้อยสายไฟจะทำให้เกิดเซลล์โฟมขนาดเล็กๆ ที่แทรกอยู่ในเนื้อพีวีซีมาก โดยกระจายอยู่ทั่วพีวีซีโฟม และรูปร่างของเซลล์โฟมค่อนข้างกลม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณท่อร้อยสายไฟลงไป

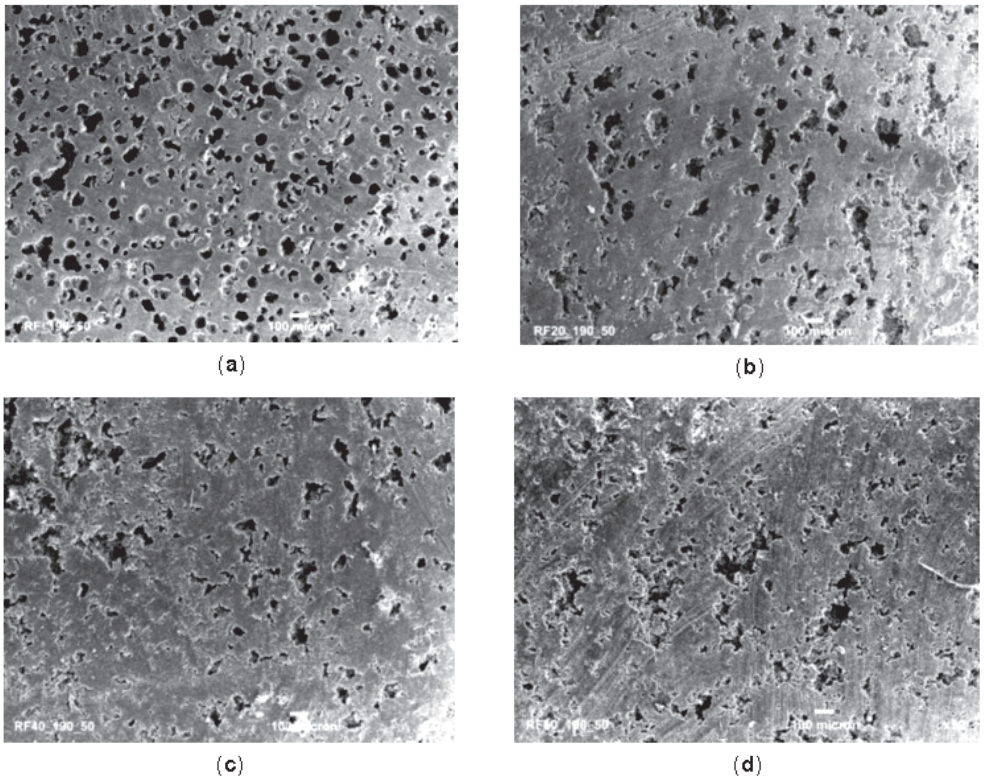

Figure 2. SEM micrographs of PVC foam (50x): (a) RF100 (b) RF+P20 (c) RF+P40 (d) RF+P60 at processing temperature of 190ºC.

ปริมาณเซลล์โฟมเริ่มน้อยลง อีกทั้งเซลล์โฟมยังมีรูปร่างไม่แน่นอนด้วย เนื่องจากการเติมท่อร้อยสายไฟทำให้เนื้อพีวีซีโฟมเกิดการอัดตัวแน่นจนทำให้เซลล์โฟมขยายตัวในทิศทางต่างๆ ยากขึ้นและไม่เท่ากัน อีกทั้งยังส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นด้วยดัง Figure 3

ส่วนผลกระทบของอุณหภูมิการผสมช่วง 180-200ºC พบว่าอัตราการพองฟูเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากอุณหภูมิการผสม 180ºC เป็น 190ºC เนื่องจากอุณหภูมิการผสมเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้เกิดการหลอมตัวที่สมบูรณ์มากขึ้น พร้อมที่จะเกิดเซลล์โฟมในเนื้อพีวีซีได้ ส่วนในช่วงอุณหภูมิการผสม 190ºC และ 200ºC พบว่าเมื่อไม่มีการเติมท่อร้อยสายไฟอัตราการพองฟูที่อุณหภูมิการผสม 200ºC มากกว่า 190ºC แต่เมื่อเติมท่อร้อยสายไฟทำให้ไปรบกวนการเกิดเซลล์โฟมในเนื้อพีวีซี ซึ่งทำให้อัตราการพองฟูของอุณหภูมิการผสม 190ºC และ 200ºC มีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น เนื่องจากผลกระทบของท่อร้อยสายไฟมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิการผสมของการเกิดเซลล์โฟมในเนื้อพีวีซี จากผลอัตราการพองฟูจึงทำให้ค่าความหนาแน่นของพีวีซีโฟมที่อุณหภูมิการผสม 180ºC มีค่าสูงกว่า 190ºC และ 200ºC และช่วงอุณหภูมิการผสม 190ºC และ 200ºC แสดงผลสอดคล้องกับผลของค่าอัตราการพองฟูข้างต้นด้วย กล่าวคือ ช่วงที่ไม่มีการเติมท่อร้อยสายไฟค่าความหนาแน่นของพีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิการผสม 200ºC มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิการผสม 190ºC แต่เมื่อเติมท่อร้อยสายไฟความหนาแน่นของพีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิการผสมทั้ง 190ºC และ 200ºC มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

สำหรับสมบัติทางกลของพีวีซีโฟม ปริมาณการเติมท่อร้อยสายไฟไม่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด (ไม่แสดงในรูปของกราฟ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20 MPa) แต่ส่งผลต่อค่าความทนแรงกระแทก ทนแรงดัด และความแข็งที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดัง Figure 4, Figure 5 และ Figure 6 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นข้างต้น โดยเฉพาะความทนแรงกระแทกที่เพิ่ม

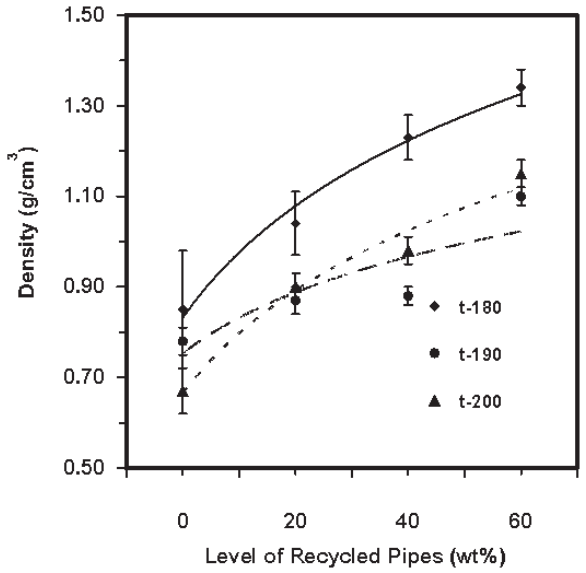

Figure 3. Density vs level of recycled pipes of PVC foam at various processing temperatures.

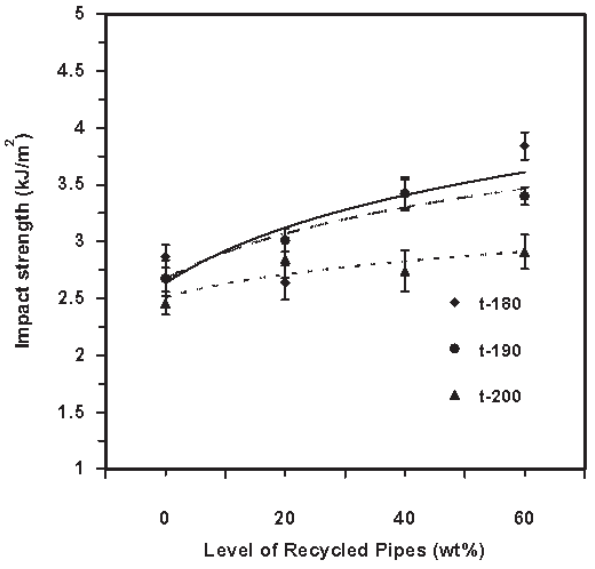

Figure 4. Impact strength vs level of recycled pipes of PVC foam at various processing temperatures.

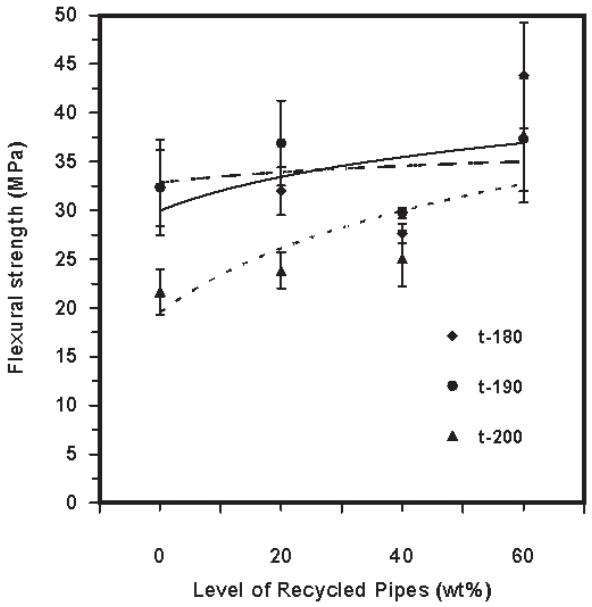

Figure 5. Flexural strength vs level of recycled pipes of PVC foam at various processing temperatures.

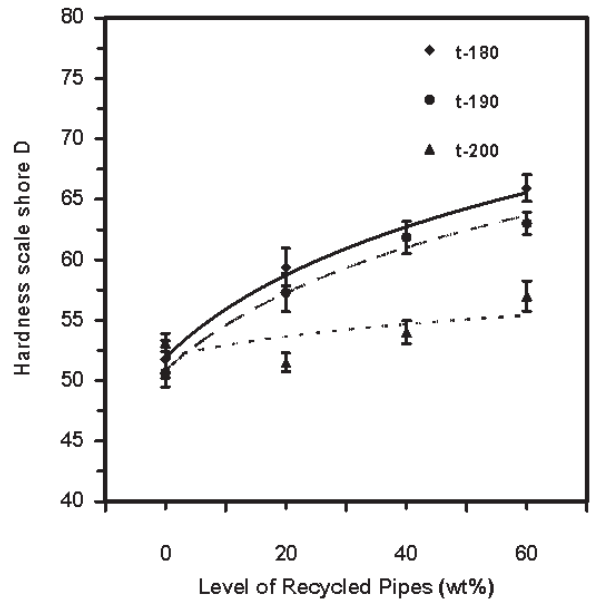

Figure 6. Hardness vs level of recycled pipes of PVC foam at various processing temperatures.

สูงขึ้นนี้เกิดจากการอัดแน่นและความต่อเนื่องของเนื้อพีวีซีมากขึ้นดังภาพโครงสร้างจุลภาค Figure 2 ข้างต้น ทำให้แรงที่กระทำกับวัสดุสามารถส่งถ่ายพลังงานบนเนื้อพีวีซีได้อย่างต่อเนื่องหรือที่เรียกว่ามีการดูดซับพลังงานไว้ได้มากขึ้น ส่วนผลกระทบของอุณหภูมิการผสมที่มีต่อสมบัติทางกลให้ผลสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของพีวีซีโฟม กล่าวคือ

พีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิการผสม 180ºC และ 190ºC ให้ค่าความทนแรงกระแทก ทนแรงดัด และความแข็งใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าค่าความหนาแน่นของพีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิการผสม 190ºC มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิการผสม 180ºC ก็ตาม นั่นอาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิการผสม 190ºC ส่งผลให้มีการเกิดเซลล์โฟมขนาดเล็กๆ ปริมาณมากกระจายในเนื้อพีวีซีได้ดี จึงทำให้สมบัติทางกลใกล้เคียงกับพีวีซีโฟมที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180ºC แต่เมื่อขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่อุณหภูมิการผสม 200ºC อาจเป็นผลให้เซลล์โฟมเล็กๆ ที่มีอยู่มากเกินไปเกิดการรวมตัวกันอีกครั้ง จนส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงอย่างเห็นได้ชัด

2. ผลการทดสอบสมบัติพีวีซีที่มีการเติมขวดแชมพู

ผลการทดสอบการขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีการเติมขวดแชมพู พบว่าเมื่อเติมขวดแชมพูเพิ่มมากขึ้น สีของพีวีซีโฟมเริ่มคล้ำมากขึ้นและในบางอุณหภูมิการผสมที่ทำให้เกิดการไหม้ของพีวีซีด้วย ดังนั้นช่วงของการเติมขวดแชมพูที่สามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมได้และให้ลักษณะผิวที่ยอมรับได้คือ 0-60%โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการผสมไม่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราการพองฟูมากนัก ดัง Figure 7 ยกเว้นอุณหภูมิที่ 175ºC เนื่องจากผลของอุณหภูมิยังส่งผลต่อการหลอมตัวของพีวีซีที่ไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อเติมขวดแชมพูในปริมาณมากขึ้นกลับทำให้อัตราการพองฟูเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในขวดแชมพูส่งผลต่อการเกิดโฟมด้วย โดยเฉพาะสารช่วยในกระบวนการผลิตที่มีอยู่ในขวดแชมพูประมาณ 1-2 phr (Deniel and Kurt, 1991) นั้น ช่วยทำหน้าที่ในการทำให้เกิดการหลอมตัวของพีวีซีได้ดีขึ้น

สำหรับสมบัติทางกายภาพของพีวีซีโฟม พบว่าปริมาณการเติมขวดแชมพูมากขึ้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ดัง Figure 8 เนื่องจากส่วนประกอบพีวีซีบริสุทธิ์เกรดโฟมแข็งเกร็งและขวดแชมพูที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีความคล้ายกัน (Titow, 1990) เสมือนเป็นพีวีซีเกรดเดียวกัน แต่กลับส่งผลต่อรูปร่างเซลล์โฟมที่ต่างกันคือ ในช่วงที่ไม่มีการเติมขวดแชมพูรูปร่างเซลล์โฟมค่อนข้างกลมแต่เมื่อเติมขวดแชมพูมากขึ้น รูปร่างเซลล์โฟมกลับมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดัง Figure 9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพีวีซีโฟมที่มีการเติมขวดแชมพูเพิ่มขึ้น จาก 0 20 40 60 %โดยน้ำหนัก ในรูป (a) (b) (c) และ (d) ตามลำดับ

จากผลของค่าความหนาแน่นข้างต้นจึงไม่ทำให้ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความทนแรงดึงสูงสุด และความ

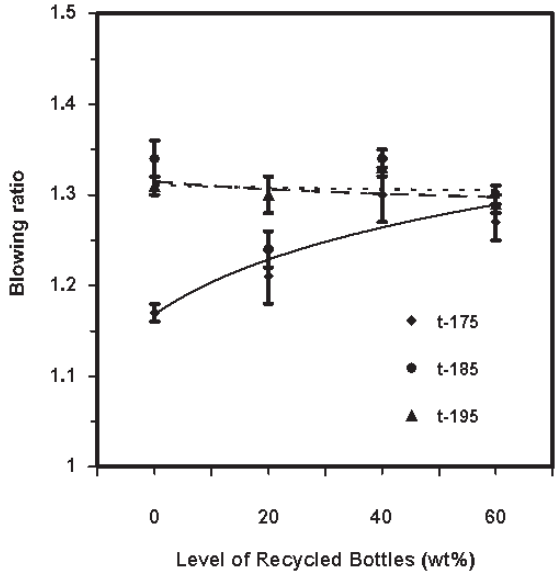

Figure 7. Blowing ratio vs level of recycled bottles of PVC foam at various processing temperatures

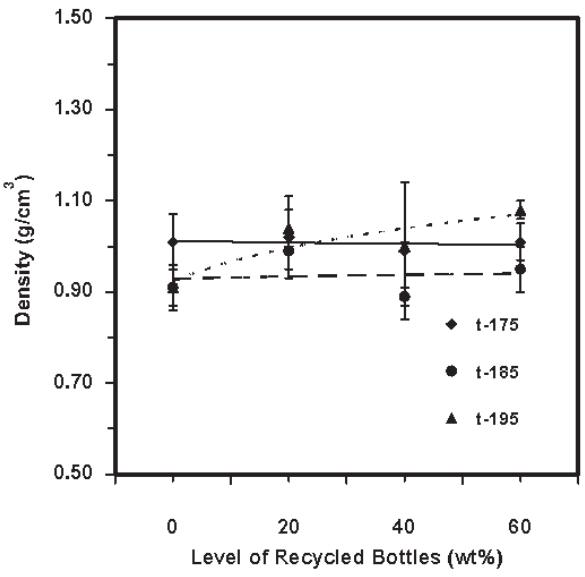

Figure 8. Density vs level of recycled bottles of PVC foam at various processing temperatures

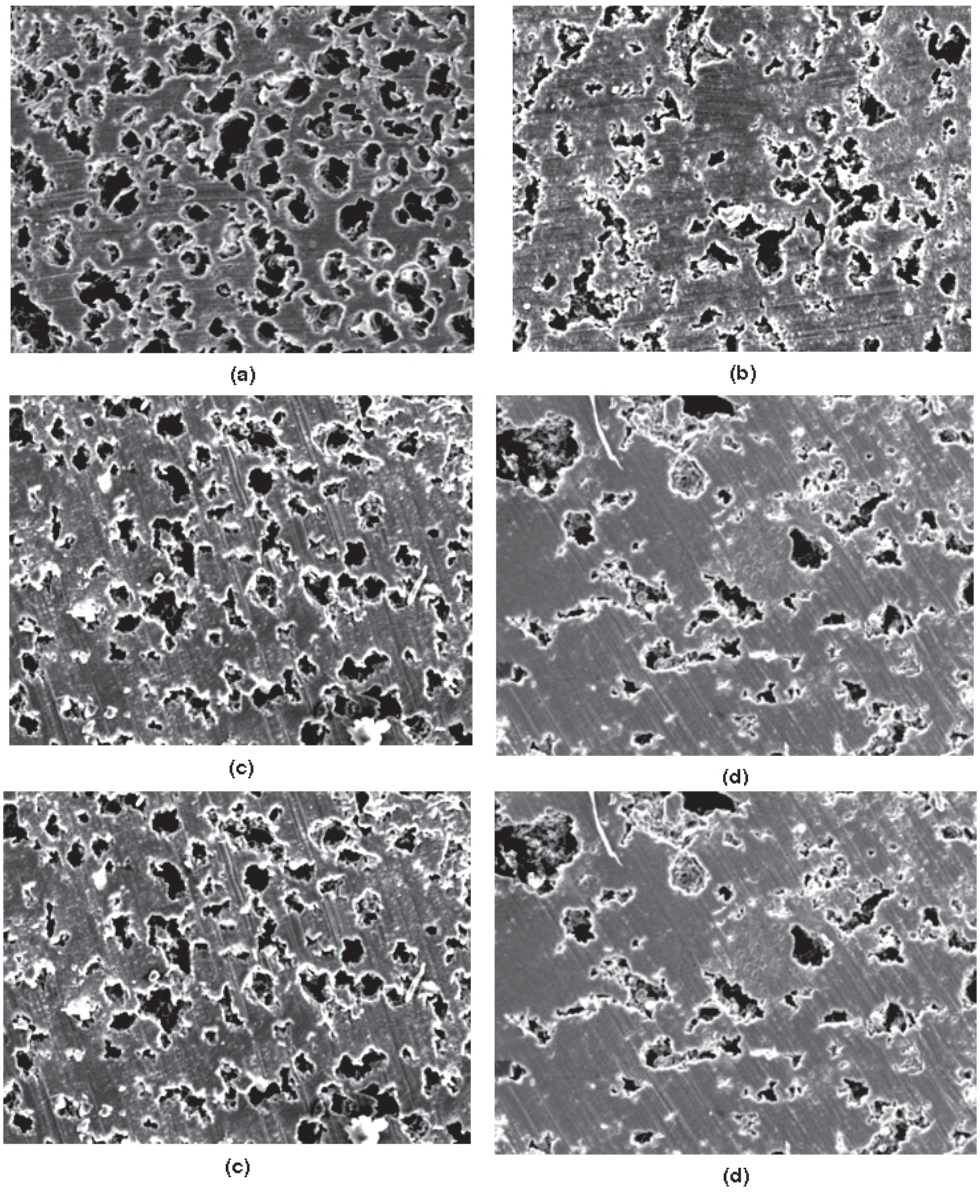

Figure 9. SEM micrographs of PVC foam (150x): (a) RF100 (b) RF+B20 (c) RF+B40 (d) RF+B60 at processing temperature of 185ºC.

ทนแรงดัดเปลี่ยนแปลงไป (ไม่แสดงในรูปกราฟ ซึ่งมีค่าความทนแรงดึงสูงสุดอยู่ระหว่าง 7-15 MPa ส่วนค่าความทนแรงดัดอยู่ระหว่าง 30-45 MPa) ส่วนค่าความทนแรงกระแทกและค่าความแข็งเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ ค่าทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งกลับลดลง ดัง Figure 10 และ Figure 11 ตามลำดับ เนื่องจากในขวดแชมพูมีสารประกอบประเภทสารเพิ่มความทนแรงกระแทกและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Titow, 1990) โดยที่ยังไม่สูญเสียไปเพราะส่วนมากการใช้งานขวดแชมพูจะไม่ถูกแสงแดดที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายไป และจากอุณหภูมิการผสมในช่วง 175-195ºC ที่ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น จึงไม่ทำให้สมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปด้วย

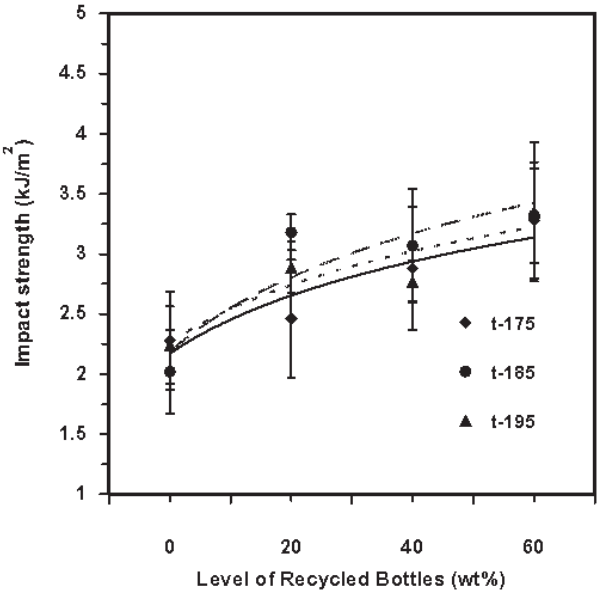

Figure 10. Impact strength vs level of recycled bottles of PVC foam at various processing temperatures.

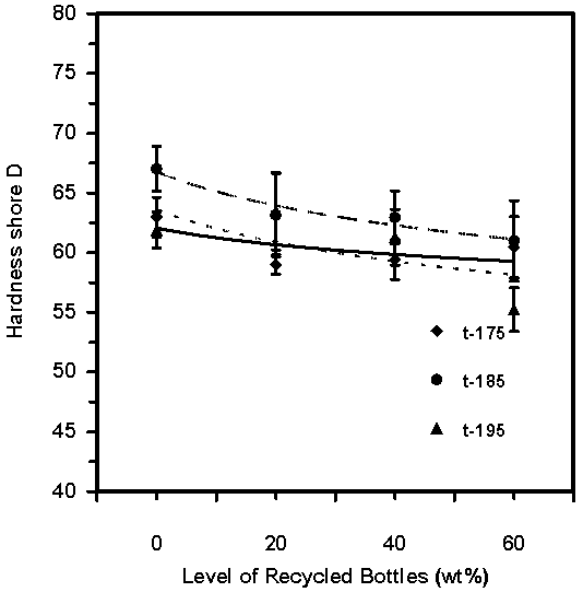

Figure 11. Hardness vs level of recycled bottles of PVC foam at various processing temperatures.

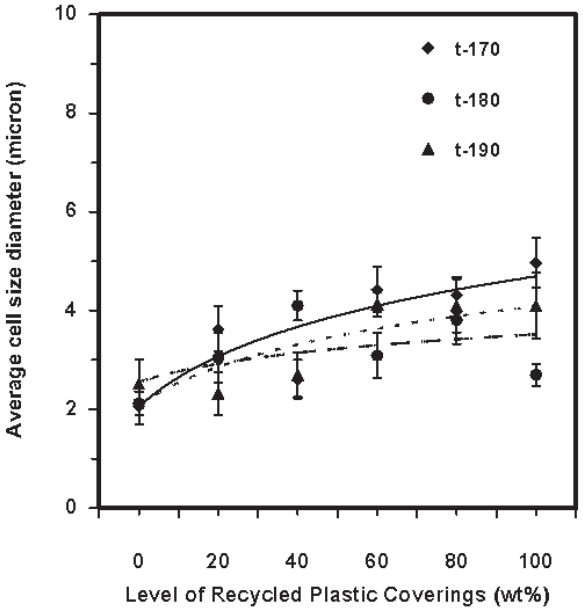

Figure 12. Average cell size diameter vs level of recycled coverings of PVC foam at various processing temperatures.

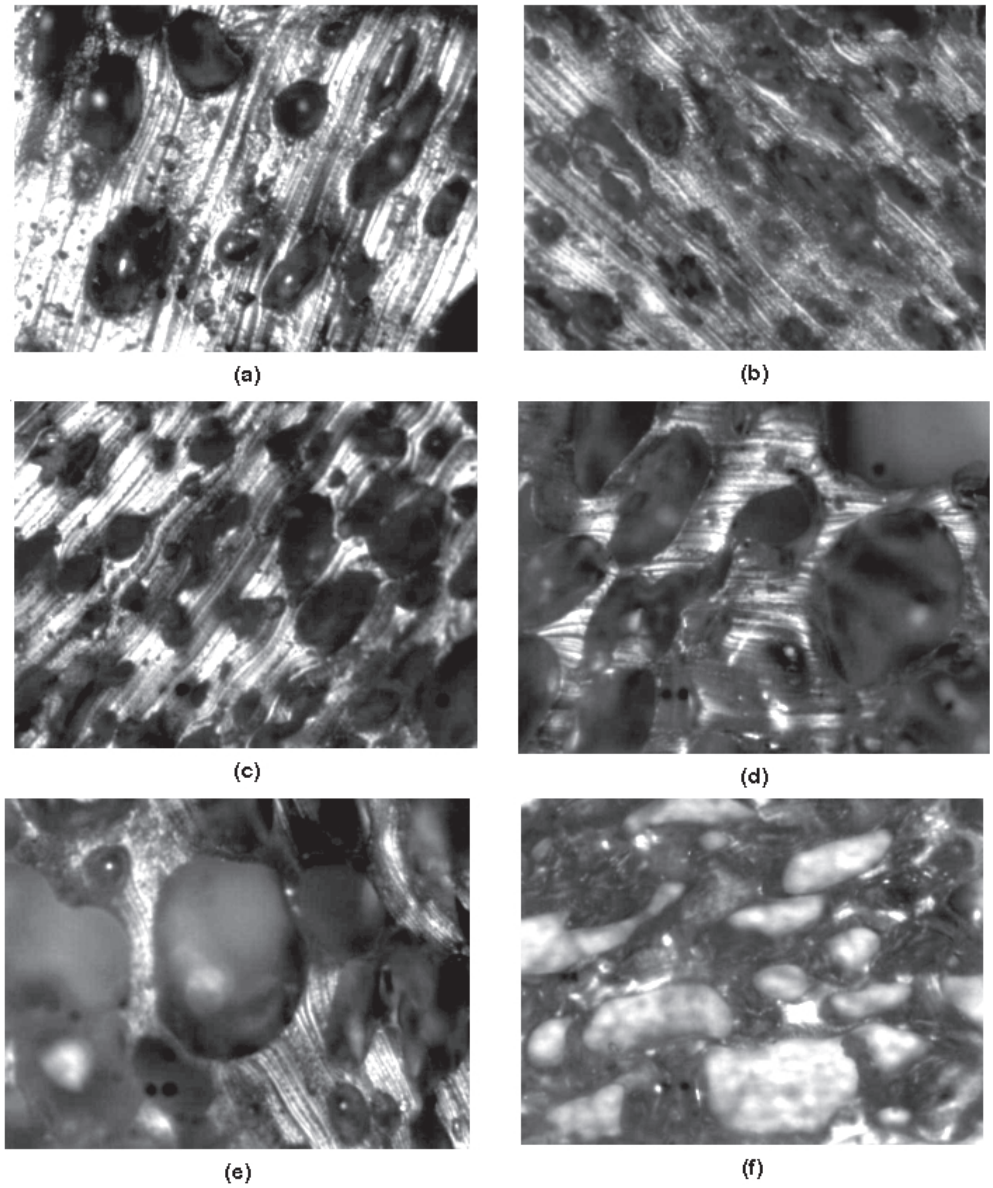

Figure 13. SEM micrographs of PVC foam (50x): (a) SF100 (b) SF+PC20 (c) SF+PC40 (d) SF+PC60 (e) SF+PC80 (f) SF+PC100 at processing temperature of 170ºC.

3. ผลการทดสอบสมบัติพีวีซีที่มีการเติมปกพลาสติก

ผลการทดสอบการขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีการเติมปกพลาสติก พบว่าเมื่อเติมปกพลาสติกมากขึ้นสีของพีวีซีโฟมอ่อนไม่เปลี่ยนไป เนื่องจากปกพลาสติกที่ใช้เป็นชนิดใส สำหรับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่าปริมาณการเติมปกพลาสติกส่งผลต่อแนวโน้มของขนาดผ่านศูนย์กลางของเซลล์โฟมเฉลี่ยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดัง Figure 12 เนื่องจากการเติมปกพลาสติกมากขึ้น เสมือนมีการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (plasticizer) มากขึ้น ทำให้ความหนืดของพีวีซีลดน้อยลง (Benning, 1969) และเกิดการหลอมตัวของพีวีซีที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดโฟมที่ง่ายขึ้นและขยายตัวได้ดีด้วย ดัง Figure 13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพีวีซีโฟมที่มีการเติมปกพลาสติกเพิ่มขึ้น จาก 0 20 40 60 80 100 %โดยน้ำหนัก ในรูป (a) (b)

(c) (d) (e) และ (f) ตามลำดับ อีกทั้งในช่วงที่มีการเกิดโฟมที่เสถียร ณ ภาวะสมดุล หากโพลิเมอร์มีความหนืดต่ำทำให้มีการขยายตัวของเซลล์โฟมได้มากขึ้น (Edenbaum, 1992)

ผลการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าแนวโน้มค่าความทนแรงดึงสูงสุด และความแข็งลดลงเมื่อมีปริมาณปกพลาสติกมากขึ้น ดัง Figure 14 และ Figure 15 ซึ่งการที่ทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดและความแข็งลดลงนั้นมี 2 กรณีคือ ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เป็นส่วนประกอบในปกพลาสติก (Titow, 1990) ทำให้พีวีซีมีความอ่อนตัวมากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้เกิดเซลล์โฟมได้ง่ายและเกิดขนาดเซลล์โฟมใหญ่ขึ้นดังผลการที่ผ่านมาข้างต้นด้วย สำหรับอุณหภูมิขึ้นรูปไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลมากนัก ยกเว้นในการขึ้นรูป ณ อุณหภูมิ 170ºC เมื่อมีปกพลาสติก 20 และ 40% โดยน้ำหนัก ให้ค่าสมบัติทางกลค่อนข้างสูงกว่าการขึ้นรูป ณ อุณหภูมิ 180ºC และ 190ºC ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้อาจจะยังมีการหลอมตัวที่ไม่สมบูรณ์นักที่ทำให้อัตราการเกิดโฟมน้อยกว่า

สรุปผลการทดลอง

1. การนำท่อร้อยสายไฟกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ พบว่า

1) อุณหภูมิการผสมที่เหมาะสม คือ 190ºC ณ ความเร็วรอบสกรู 40 รอบ/นาที ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของโฟมได้ดี และทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง อีกทั้งยังให้ค่าทนแรงกระแทก ทนแรงดัด และความแข็งสูงด้วย

2) สามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีท่อร้อยสายไฟได้สูงสุด 60%โดยน้ำหนัก และทำให้ค่าทนแรงกระแทก ทนแรงดัด และความแข็งที่สูงสุดด้วย

2. การนำขวดแชมพูกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ พบว่า

1) อุณหภูมิการผสมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 185-195ºC ณ ความเร็วรอบสกรู 30 รอบ/นาที ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของโฟมได้ดี และทำให้ค่าความหนาแน่น ทนแรงดึง ทนแรงดัด ทนแรงกระแทก และความแข็งใกล้เคียงกัน

2) สามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีขวดแชมพูได้สูงสุด 60% โดยน้ำหนัก และให้ค่าทนแรงกระแทกสูงสุดด้วย

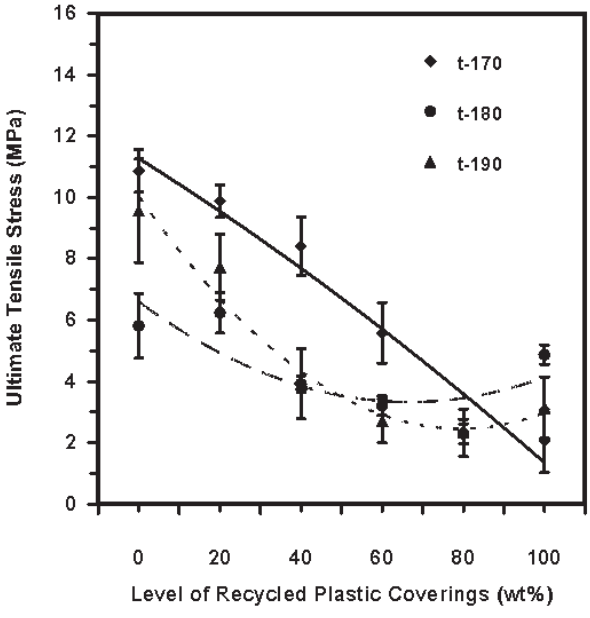

Figure 14. Ultimate Tensile Stress vs level of recycled coverings of PVC foam at various processing temperatures.

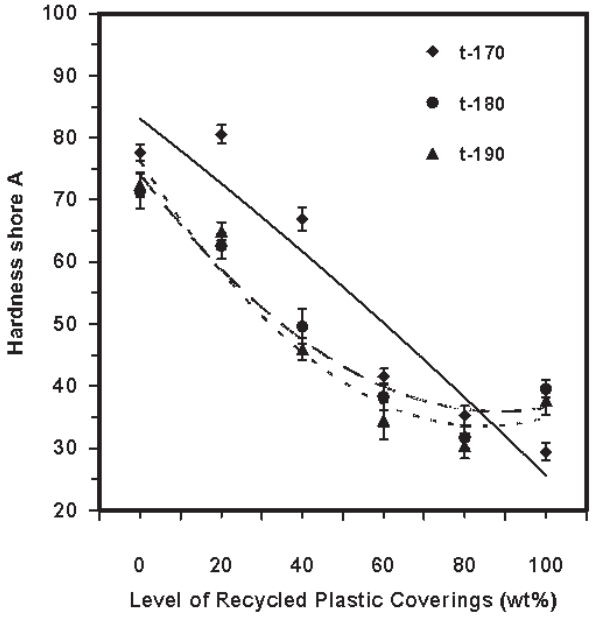

Figure 15. Hardness vs level of recycled coverings of PVC foam at various processing temperatures.

3. การนำปกพลาสติกกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ พบว่า

1) อุณหภูมิขึ้นรูปที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 180-190ºC ด้วยเวลาอัดขึ้นรูป 3 นาที ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของโฟมได้ดี

2) สามารถขึ้นรูปพีวีซีโฟมที่มีปกพลาสติกได้สูงสุด 100%โดยน้ำหนัก แต่ให้ค่าทนแรงดึงและความแข็งลดลงต่ำสุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับการให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) บริษัท VP Plastic Products (1993) จำกัด และบริษัท Clariant จำกัด สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้คณะวิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลองหก สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2546. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน (ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศิรินทร ทองแสง ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ อำนวย ลาภเกษมสุข. 2544. การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำท่อน้ำพีวีซีที่ใช้แล้วกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่, ว.สงขลานครินทร์ วทท. 23:275-289.

Benning, C.J. 1969. Plastics Foams: The Physics and Chemistry. John Willey, New York.

Deniel, K. and Kurt, C.F. 1991. Handbook of polymeric foams and foam technology. Hanser, Munich.

Edenbaum, J. 1992. Plastics Additives and Modifiers Handbook. VNR, New York.

Laurent, M.M., Chul, B.P. and John, J.B. 1997. Processing and cell Morphology relationships for microcellular foamed PVC/wood-fiber composites, Polym. Eng. Sci., 37: 1137-1147.

Patterson, J. 1997. Vinyl foam: effect of density on physical properties, SPE ANTEC Tech. Papers, 18: 3560-3567.

Rabinovitch, E.B., Isner, J.D. and Wiell, D.J. 1997. Effect of extrusion conditions on rigid PVC foam, SPE ANTEC Tech. Papers, 18: 3554-3559.

Sombatsompop, N. and Thongsang, S. 2001. The rheology, morphology, and mechanical and thermal properties of recycled PVC pipes, J. Appl. Polym. Sci., 82: 2478-2486.

Thomas, N.L. and Quirk, J.P. 1995. Use of bottle recyclate in rigid PVC foam, Plast. Rubb. Comp. Process. Appl., 24: 89-96.

Titow, W.V. 1990. PVC Plastic: Properties Processing and Applications. Elesivier Applied Science, London and New York.

Weller, J.E., Ma, M., Montecillo, R. and Kumar, V. 1997. The tensile properties of microcellular PVC: the effects of additives and foam density, SPE ANTEC Tech. Papers, 18: 2055-2059.