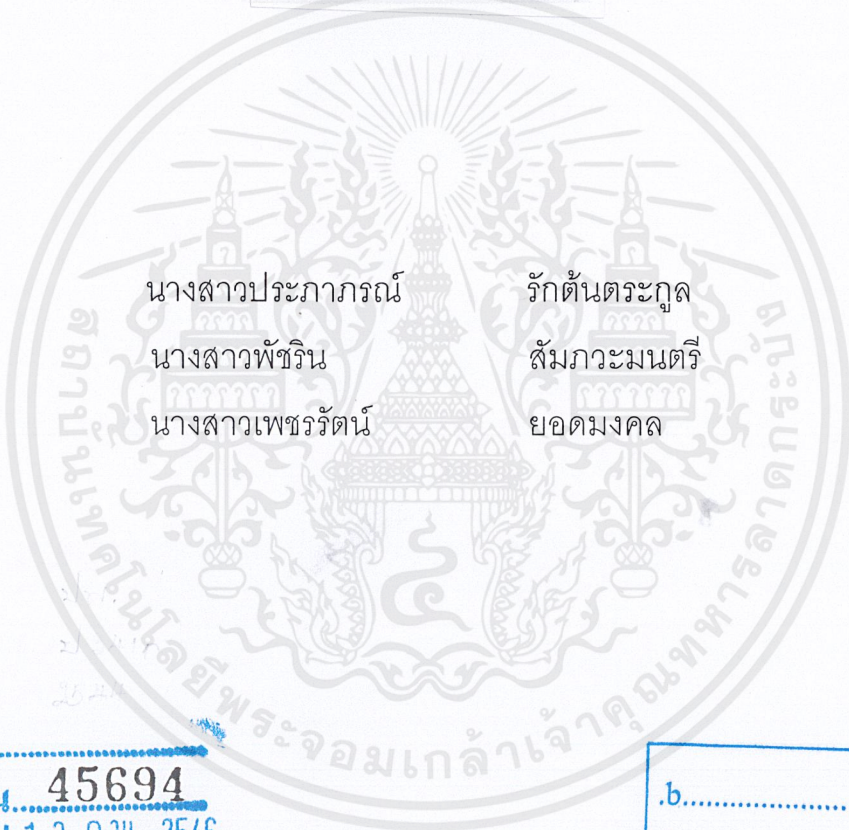


การศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์



นางสาวประภาภรณ์ รักตันตระกูล
นางสาวพัชริน สัมภวะมนตรี
นางสาวเพชรรัตน์ ยอดมงคล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 45694
วัน, เดือน, ปี..... 13 ก.พ. 2546

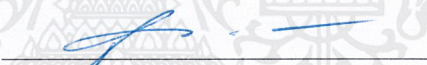
b.....
i.....


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

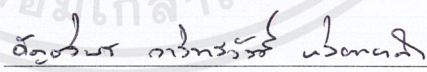
ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์
โดย นางสาวประภาภรณ์ รักต้นตระกูล
นางสาวพัชริน สัมภวะมนตรี
นางสาวเพชรรัตน์ ยอดมงคล
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

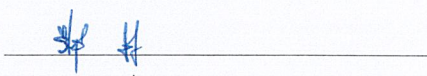
ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


กรรมการ
(ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)


กรรมการ
(ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


กรรมการ
(อาจารย์รณฤดี เบญจางคประเสริฐ)

| | | |
|----------------------|---|--------------|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง | การศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ | |
| โดย | นางสาวประภาภรณ์ | รักต้นตระกูล |
| | นางสาวพัชริน | สัมภวะมนตรี |
| | นางสาวเพชรรัตน์ | ยอดมงคล |
| ภาควิชาวิศวกรรมเคมี | คณะวิศวกรรมศาสตร์ | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.ไพศาล | นาคพิพัฒน์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผศ.ดร.ประกอบ | กิจไชยา |
| ปริญญานิพนธ์ | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง | |

บทคัดย่อ

วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมและขยะพลาสติก ซึ่งได้แก่เศษหนังสัตว์จากโรงงานฟอกหนังและขวดน้ำพอลิเอทิลีนได้ถูกนำมาทำเป็นวัสดุประกอบ จากนั้นนำไปหาสมบัติต่างๆ สำหรับการศึกษานี้จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุทั้งสองชนิด เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น และการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นวัสดุ โดยอัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ ที่อัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก สำหรับสมบัติของชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบจะมีค่าความต้านแรงดึงอยู่ในช่วง 15-19 เมกะปาสคาล ค่าร้อยละการยืดออก ณ จุดขาดอยู่ในช่วงร้อยละ 11-13 ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 54-63 เมกะปาสคาล ค่าความต้านแรงกระแทกอยู่ในช่วง 5-8 กิโลจูลต่อตารางเมตร ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 59-63 (shore D) ค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.05-0.07 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและการละลายน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-5.3 และ 0.3-3.4 ตามลำดับ และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.94-1.20

| | | |
|--------------|--|----------------|
| Report Title | The study of properties of polyethylene-leather composite | |
| By | Miss Prapaporn | Raktontrakoon |
| | Miss Patcharin | Samphawamontri |
| | Miss Petcharat | Yodmongkon |
| Advisor | Asst. Prof. Dr. Paisal Nakpipat | |
| Co-advisor | Asst. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya | |
| Report for | Bachelor Degree of Chemical Engineering | |
| | Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering | |
| | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang | |

Abstract

The residue from industrial factories and used plastics which are the leather waste from the tanning industry and polyethylene bottle waste being applied as composite and tested for the properties. There are two sections in this study. The first part is to find the suitable ratio of both materials for forming as a sheet. Next, the sheet would be tested for its properties. It was found that the suitable weight ratio of the leather waste is less than 40 percent. The tested specimens have tensile strength in the range of 15-19 MPa, elongation at break point in the range of 11-13 percent, modulus of elasticity in the range of 54-63 MPa, impact strength in the range of 5-8 kJ/m², hardness in the range of 59-63 (shore D), thermal conductivity in the range of 0.05-0.07 W/m.°C, water absorption (%) in the range of 0.4-5.3, water solubility (%) in the range of 0.3-3.4 and specific gravity in the range of 0.94-1.20.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากผู้ทรงคุณวุฒิหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณทุกท่าน ดังต่อไปนี้

คุณภักคนัย ทองทิอัมพร เจ้าหน้าที่กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรมและพอลิเมอร์เทคโนโลยีภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ และ ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดมา

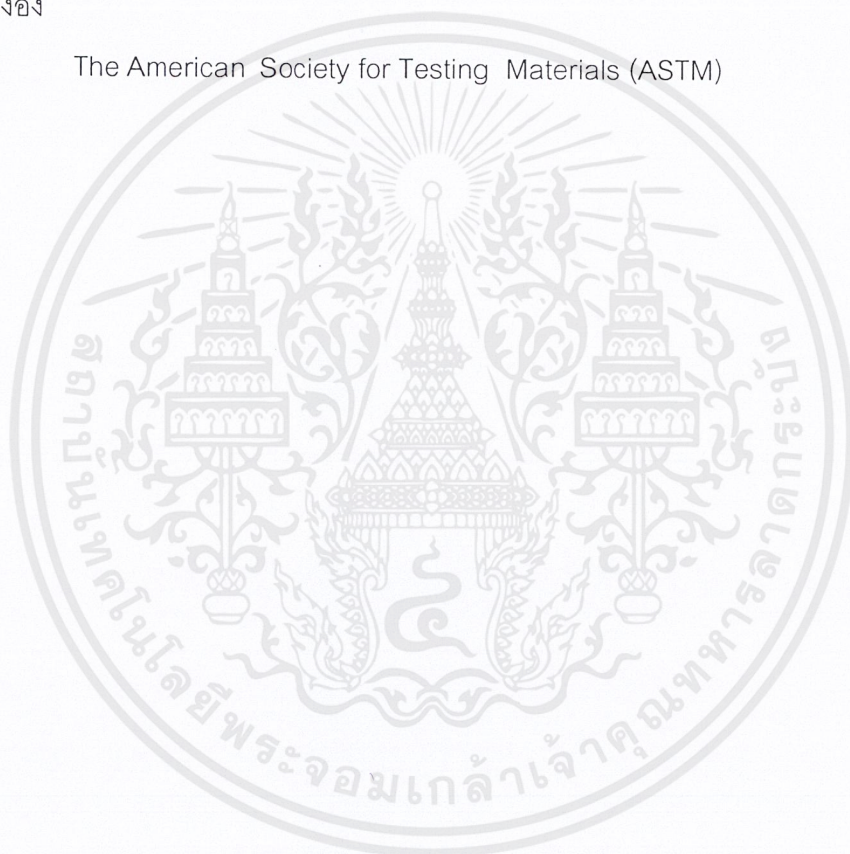
ประกาศณีย์ รักต้นตระกูล
พัชริน สัมภาวะมนตรี
เพชรรัตน์ ยอดมงคล

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| กิตติกรรมประกาศ | จ |
| สารบัญ | ฉ |
| สารบัญภาพ | ช |
| สารบัญตาราง | ณ |
| สัญลักษณ์ | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1.ความเป็นมาของโครงการ | 1 |
| 1.2.วัตถุประสงค์ของโครงการ | 1 |
| 1.3.ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.4.ขั้นตอนการดำเนินงาน | 2 |
| 1.5.ประโยชน์ที่ได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | 4 |
| 2.1.วัสดุประกอบ | 4 |
| 2.2.ฉนวนกันความร้อน | 7 |
| 2.3.วัสดุปูพื้น | 14 |
| บทที่ 3 การทดลอง | 16 |
| 3.1.วัสดุและสารเคมีที่ใช้ | 16 |
| 3.2.อุปกรณ์และเครื่องมือ | 16 |
| 3.3.วิธีการทดลอง | 17 |
| 3.4.การทดสอบ | 18 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ | 20 |
| 4.1.การวิเคราะห์ส่วนผสมของพอลิเอทิลีนที่เจือด้วยเศษหนังสือรีไซเคิล | 20 |
| 4.2.การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล | 21 |
| 4.3.การวิเคราะห์การนำความร้อน | 27 |
| 4.4.การวิเคราะห์การดูดซับน้ำและการละลายน้ำ | 29 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.5.การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ | 31 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง | 33 |
| 5.1.ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัย | 33 |
| 5.2.ข้อเสนอแนะ | 35 |
| เอกสารอ้างอิง | 39 |
| ภาคผนวก The American Society for Testing Materials (ASTM) | 41 |



สารบัญญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการพอกหนัง | 6 |
| รูปที่ 2.2 การแปรเปลี่ยนค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนกับความหนาแน่น | 7 |
| รูปที่ 2.3 การนำความร้อนผ่านผนังระนาบขนาดใหญ่ | 10 |
| รูปที่ 2.4 แบบจำลองอย่างง่ายในการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ | 13 |
| รูปที่ 4.1 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 21 |
| รูปที่ 4.2 ค่าร้อยละการยืดออก ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 22 |
| รูปที่ 4.3 ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 23 |
| รูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 24 |
| รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 26 |
| รูปที่ 4.6 ค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 27 |
| รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและการละลายน้ำของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 29 |
| รูปที่ 4.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 31 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ค่าความหนาของฉนวนกันความร้อนที่แนะนำสำหรับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงและเป็นแผ่นบาง | 8 |
| ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิห้อง | 12 |
| ตารางที่ 4.1 ผลการสังเกตเมื่อดมผลิตภัณฑ์ของผสมในอัตราส่วนต่างๆ | 20 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 21 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าร้อยละการยืดออก ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 22 |
| ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 23 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 24 |
| ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 25 |
| ตารางที่ 4.7 ค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 27 |
| ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 28 |
| ตารางที่ 4.9 ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและการละลายน้ำของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 29 |
| ตารางที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม | 31 |
| ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์กับวัสดุปูพื้นที่พบในท้องตลาด | 35 |
| ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบสมบัติบางประการของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์กับฉนวนกันความร้อนที่พบในท้องตลาด | 36 |
| ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์กับวัสดุประกอบพอลิเมอร์ชนิดอื่น | 37 |

สัญลักษณ์

| | |
|------------------|--|
| A | พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (ตารางเมตร) |
| C_p | ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส) |
| k | ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส) |
| L | ความหนา (เมตร) |
| \dot{Q} | อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์) |
| \dot{Q}_{cond} | อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (วัตต์) |
| R | ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์) |
| r_1 | รัศมีภายในของฉนวนกันความร้อน (เมตร) |
| r_2 | รัศมีภายนอกของฉนวนกันความร้อน (เมตร) |
| S | ร้อยละการละลายในน้ำ |
| T | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |
| W_a | ร้อยละการดูดซับน้ำ |
| W_e | น้ำหนักหลังจากการดูดซับน้ำ (กรัม) |
| W_f | น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งครั้งที่ 2 (กรัม) |
| W_i | น้ำหนักหลังชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งครั้งที่ 1 (กรัม) |
| W_o | น้ำหนักก่อนจากการดูดซับน้ำ (กรัม) |
| α | ค่าการแพร่ผ่านความร้อน (ตารางเมตรต่อวินาที) |
| ρ | ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) |
| ΔT | ความแตกต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |
| Δx | ความหนา (เมตร) |

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาของโครงการ

ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นมักจะมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก เช่น เศษหนังสัตว์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของประชากรโดยรวม รวมถึงการเข้ามามีบทบาทของพลาสติกอย่างมากในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้มีพลาสติกเหลือใช้เป็นจำนวนมาก ด้วยสาเหตุนี้คณะผู้ทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุ

จากการสำรวจเขตนิคมอุตสาหกรรมฟอกหนัง จังหวัดสมุทรปราการ มีโรงงานฟอกหนังอยู่เป็นจำนวนมาก และในกระบวนการฟอกหนังจะมีเศษหนังรวมกันเป็นจำนวนมากหลายสิบตันต่อวัน การนำเศษหนังดังกล่าวมาผสมกับวัสดุยึดเกาะบางประเภทในอัตราที่เหมาะสมแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นจะสามารถนำวัสดุนี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ เช่น ใช้ทำแผ่นวัสดุปูพื้นรองพรม แผ่นฉนวนกันความร้อน แผ่นฉนวนกันเสียงสะท้อน เป็นต้น

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือ การนำของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และวัสดุเหลือใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งในที่นี้คือ เศษหนังสัตว์ที่ได้จากกลุ่มโรงงานฟอกหนัง และขูดน้ำพลาสติกเหลือใช้ มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุ โดยศึกษาส่วนผสมของวัสดุและวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ดังกล่าว รวมทั้งการศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้น

1.3. ขอบเขตของโครงการ

1. การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุทั้งสองชนิด (ได้แก่เศษหนังสัตว์และพอลิเอทิลีนใช้แล้ว) เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น

2. การทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นวัสดุ โดยในเบื้องต้นจะเน้นการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานเป็นหลัก เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ได้แก่

- ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

- ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

นอกจากนี้ จะทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ เช่น ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) ความต้านแรงกระแทก (Impact strength) ความหนาแน่น (Density) เป็นต้น

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลจากเอกสารเกี่ยวกับ วัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนัง ฉนวนกันความร้อน และตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน

3. จัดหาอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในโครงการ

4. ศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุ

5. ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมของวัสดุตามที่ได้ศึกษา

6. ทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของชิ้นงานที่ได้

7. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และทำรายงานการทดลอง

1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ

1. การลดปริมาณของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลถึงการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเหล่านี้อีกด้วย
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ศึกษามานั้นไปประยุกต์ใช้ประโยชน์สำหรับงานด้านอุตสาหกรรมบางประเภทได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1. วัสดุประกอบ (Composite materials) [1]

ในปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทของวัสดุประกอบตามโครงสร้างของส่วนประกอบได้ 6 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์คอมพอสิต (PMCs) เมทัลคอมพอสิต (MMCs) เซรามิกคอมพอสิต (CMCs) คาร์บอน-คาร์บอนคอมพอสิต (CCCs) อินเตอร์เมทัลลิกคอมพอสิต (IMCs) ไฮบริด-คอมพอสิต (HCMs) ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์คอมพอสิต

2.1.1. พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer matrix composites) [2]

เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยแยกเป็นคนละวัฏภาค โดยที่พอลิเมอร์คอมพอสิตนั้นจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อยหนึ่งส่วนเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกว่า เมตริกซ์ (Matrix) และอีกส่วนเป็นวัสดุอื่นเรียกว่าวัฏภาคกระจายตัว (Disperse phase) ซึ่งเป็นเป้าหมายในการทำคอมพอสิตคือเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น เป็นต้น รวมทั้งการลดต้นทุนในการผลิต สำหรับในโครงการนี้ได้ใช้วัสดุสองชนิด คือ เส้นใยสังเคราะห์และพอลิเอทิลีน มาผสมกันเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิต

2.1.2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ [3]

ในบรรดาสารปิโตรเคมีทั้งหลาย พอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นสารที่มีความสำคัญมากต่อชีวิตความเป็นอยู่ของเรา พอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด มีสมบัติแตกต่างกันมากมาย แต่มีคุณลักษณะร่วมซึ่งสามารถกล่าวได้ดังนี้

1. สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แม้ว่ามีรูปทรงซับซ้อนก็สามารถขึ้นรูปได้ง่ายเพียงขั้นตอนเดียว สามารถผลิตแบบปริมาณมากได้

2. น้ำหนักเบา แต่แข็งแรง

3. เติมสีส่นได้ ผิวเรียบเป็นมัน ไม่จำเป็นต้องทาสีก็สวยงาม มีหลายชนิดที่มีความ

โปร่งใส

4. ทนทานต่อน้ำและสารเคมี ไม่เป็นสนิมไม่ผุกร่อน

5. ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ใช้เป็นส่วนประกอบอุปกรณ์ไฟฟ้า

พอลิเมอร์สังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

- **วัสดุเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic materials)** วัสดุประเภทนี้เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัว เมื่อเย็นลงจะแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้งจะสามารถหลอมตัวได้อีก ตัวอย่างวัสดุประเภทนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรไพลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเมอร์ที่กล่าวมานี้มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดคือประมาณร้อยละ 70 ของพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้งหมด

- **วัสดุเทอร์โมเซต (Thermosetting materials)** มีสมบัติสามารถทำให้แข็งตัวเป็นรูปทรงตามต้องการได้โดยการให้ความร้อน เมื่อได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปแล้วจะไม่สามารถหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้อีก วัสดุในกลุ่มนี้ได้แก่ ฟีนอลิก (Phenolic) ซิลิโคน (Silicone) เมลามิน (Melamin) อีพอกซี (Epoxy) และพอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น

2.1.3. พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [4]

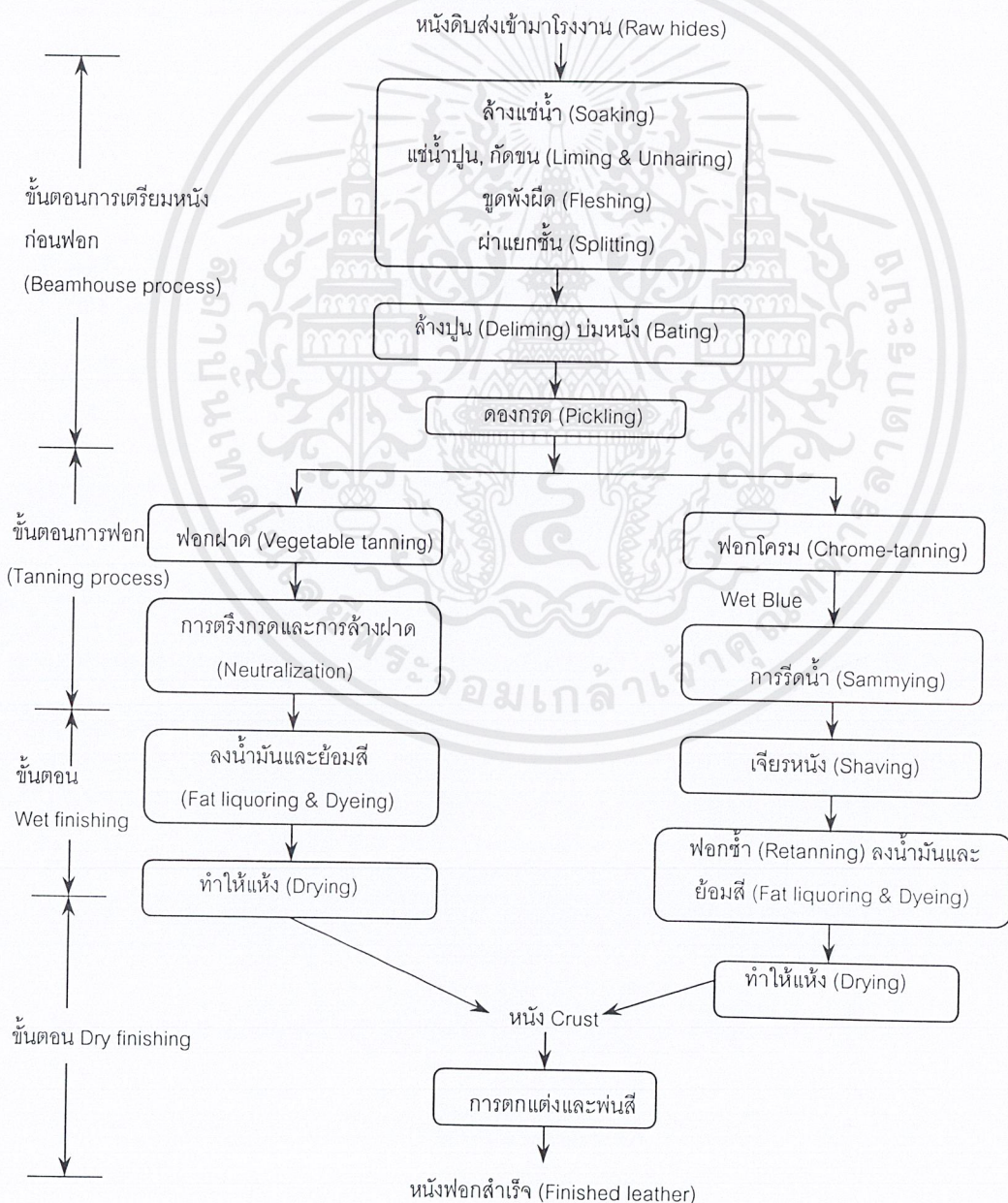
เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์ เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงลอยน้ำได้ มีสีขาวขุ่นเล็กน้อย เมื่อทำเป็นฟิล์มบางจะใส เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้มากชนิดหนึ่ง

| | |
|-------------------|---|
| สมบัติ | อ่อนบิดงอได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ทนความเย็นต่ำ 0-40 องศาเซลเซียส ไม่แตกหัก ทนแรงกระแทก มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ดูดซึมน้ำต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ |
| มีความต้านทานต่อ | กรด ด่าง สารละลาย แอลกอฮอล์ ก๊าซโซลีน น้ำ น้ำมัน |
| ไม่ทนต่อ | กลืน คลอรีน ไฮโดรคาร์บอน |
| ข้อพิสูจน์ | ง่ายต่อการติดไฟ จะติดไฟอย่างต่อเนื่อง เปลวไฟสว่าง แกนกลางเปลวมีสีน้ำเงิน มีกลิ่นคล้ายพาราฟิน |
| ตัวอย่างการใช้งาน | ของใช้ในบ้าน ท่อ ของเล่น ภาชนะบรรจุ ถึง |
| การนำกลับมาใช้ | นำกลับมาใช้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ |

2.1.4. หนังสัตว์

เป็นโปรตีนแบบเส้นใยหรือแท่ง (Fibrous หรือ Rod protein) ซึ่งเกิดจากสายพอลิ-เปปไทด์ยาวหลายสายมารวมกันพันเป็นเกลียว หรือเรียงเป็นแผ่นซ้อนๆ กันโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย เช่น ไดซัลไฟด์ (-S-S-) และพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก จะเห็นว่าโปรตีนพวกนี้ส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้ความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น [5]

การนำหนังสัตว์มาใช้ประโยชน์อย่างหนึ่งที่สำคัญคือ การนำหนังมาฟอกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์โดยนำไปทำกระเป๋า เสื้อผ้า เครื่องเรือน การผลิตหนังฟอกแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ คือ การเตรียมหนังก่อนฟอก การฟอก และการตกแต่งโดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการฟอกหนัง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เศษหนังที่ใช้ในโครงการนี้ได้มาจากขั้นตอนการตัดเจียร ซึ่งจัดเป็นกากของเสียที่เป็นอันตรายเนื่องจากมีโครเมียมอยู่สูงถึงร้อยละ 1-8 ของน้ำหนักแห้ง เศษหนังสัตว์เจียรเหล่านี้ไม่ควรนำไปฝังหรือใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง เพราะอาจทำให้โครเมียมถูกชะล้างลงสู่น้ำผิวดิน และมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ [6]

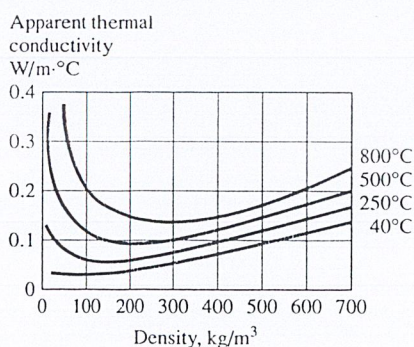
2.2. ฉนวนกันความร้อน (Thermal insulator) [7]

ฉนวนกันความร้อน คือ วัสดุใดๆ หรือ การรวมกันของวัสดุ ใดๆ ที่ส่วนมากจะถูกใช้เพื่อให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อน ฉนวนกันความร้อนส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ทำจากวัสดุที่มีสมบัติในการนำความร้อนต่ำ และมีฟองอากาศรวมอยู่ในนั้น (Air pockets)

2.2.1. สมบัติของฉนวนกันความร้อน (Properties of insulation)

- ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) จะเป็นการวัดความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุแต่ละอัน ยิ่งค่าการนำความร้อนต่ำ ประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนจะยิ่งมากขึ้น ณ ความหนาหนึ่ง หรืออาจกล่าวได้ว่าฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุด คือ ฉนวนกันความร้อนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด โดยหน่วยของค่าการนำความร้อนในหน่วยเอสไอ คือ วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส สำหรับค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจะอยู่ในช่วง 0.05-0.8 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส [7]

- ความหนาแน่น (Density) ความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนโดยทั่วไป จะถูกระบุอยู่ในตารางสมบัติเนื่องจากมันจะมีผลต่อน้ำหนัก เช่นเดียวกับกับสมบัติทางความร้อน การแปรเปลี่ยนของค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนบางชนิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแปรเปลี่ยนค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนกับความหนาแน่น [7]

- **อุณหภูมิที่ใช้งาน (Service temperature)** ผนวกรวมกันความร้อนได้ถูกออกแบบให้ใช้กับช่วงอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ และอุณหภูมิที่พื้นผิวซึ่งมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะเป็นข้อจำกัดของการเลือก สำหรับการนำผนวกรวมกันความร้อนไปใช้งานบนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูง จะมีค่าความหนาของผนวกรวมกันความร้อนที่แนะนำให้ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความหนาของผนวกรวมกันความร้อนที่แนะนำ
สำหรับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูง และเป็นแผ่นบาง [7]

| อุณหภูมิของพื้นผิว | ความหนาของผนวกรวมกันความร้อน |
|--------------------|------------------------------|
| 150°F (66°C) | 2" (5.1 cm) |
| 250°F (121°C) | 3" (7.6 cm) |
| 350°F (177°C) | 4" (10.2 cm) |
| 550°F (288°C) | 6" (15.2 cm) |
| 750°F (400°C) | 9" (22.9 cm) |
| 950°F (510°C) | 10" (25.44 cm) |

- **ความแข็งแรงด้านโครงสร้าง (Structural strength)** ผนวกรวมกันความร้อนในตำแหน่งที่ต้องช่วยเสริมความแข็งแรงในตัว เช่น พื้น หรือท่อที่ต้องรองรับการเหยียบบอยๆ จะต้องมีความต้านทานต่อการกดอัดเพียงพอ หรือต้องมีความต้านทานต่อการเจาะซึ่งสามารถที่จะทนต่อแรงที่ใช้ได้โดยไม่ทำให้เกิดการผิรุปร่างอย่างถาวรหรือถูกทำลาย ผนวกรวมกันความร้อนบางชนิดจะถูกประกอบอยู่ระหว่างโลหะ พลาสติก หรือไม้อัด เพื่อทำให้โครงสร้างของมันมีความแข็งแรงมากขึ้น ในการนำไปใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากๆ จะต้องมีส่วนประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำด้วย

สมบัติอื่นๆที่อาจมีความสำคัญนอกเหนือจากสมบัติที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ ความต้านทานต่อการตกหล่น ความคงทนถาวร ความสะดวกในการใช้งาน ความเป็นเอกภาพของรูปร่าง ความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ ขนาด ความหนา และราคา

2.2.2. ค่า R ของฉนวนกันความร้อน (The R-value of insulation)

ประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนได้ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตบางรายในรูปของค่า R คือ ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ สำหรับฉนวนกันความร้อนแบบแผ่น ค่า R จะหาได้ง่ายๆ โดยการหารความหนาของฉนวนกันความร้อนด้วยค่าการนำความร้อนของมัน ซึ่งก็คือ

$$R = \frac{L}{k} \quad (\text{Flat insulation}) \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือ ความหนา และ k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ จะสังเกตได้ว่า เมื่อความหนาเป็นสองเท่า ค่า R ของฉนวนกันความร้อนจะมีค่าเป็นสองเท่าด้วย สำหรับฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อ ค่า R สามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของความต้านทานความร้อน จาก

$$R = \frac{r_2}{k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{Pipe insulation}) \quad (2.2)$$

เมื่อ r_1 คือ รัศมีภายในของฉนวนกันความร้อน และ r_2 คือรัศมีภายนอกของฉนวนกันความร้อน เมื่อสามารถหาค่า R ได้ จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฉนวนกันความร้อนได้จาก

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \times A \quad (2.3)$$

เมื่อ \dot{Q} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฉนวนกันความร้อน ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านฉนวนกันความร้อน และ A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน โดยในที่นี้คือพื้นที่ผิวภายนอกของทรงกระบอก

2.2.3. กลไกการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer mechanisms)

กระบวนการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง เป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างทั้ง 2 จุดนั้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้ง 2 จุด โดยการถ่ายเทความร้อนจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ

1. การนำความร้อน (Conduction)
2. การพาความร้อน (Convection)
3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

โดยทั้ง 3 รูปแบบในการถ่ายเทความร้อนนี้ จะต้องเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สำหรับในโครง-

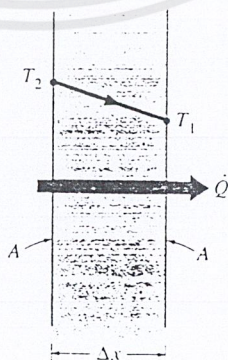
งานนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สำคัญของการถ่ายเทความร้อนในการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

2.2.4. การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูง ไปยังอนุภาคข้างเคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 วัฏภาค คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ โดยการนำความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกัน สำหรับในวัฏภาคของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนจะเกิดเนื่องจากการชนกัน (Collision) และการแพร่ (Diffusion) ของอนุภาคซึ่งมีการเคลื่อนไหวยุติแบบสุ่ม (Random) และสำหรับในวัฏภาคของแข็ง การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือน (Vibration) ของอนุภาค และการส่งผ่านพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons)

สำหรับอัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางนั้นจะขึ้นกับ รูปทรงทางเรขาคณิตของตัวกลาง ความหนา และชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลาง รวมถึงที่สำคัญ คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง (Temperature difference)

เมื่อพิจารณาการนำความร้อนแบบสภาวะคงตัว (Steady-state) ผ่านผนังระนาบขนาดใหญ่ ซึ่งมีความหนา $\Delta X = L$ และมีพื้นที่ผิว A ดังรูปที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ด้านคือ $\Delta T = T_2 - T_1$ และอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังมีค่าเท่ากับ \dot{Q} จะได้ว่า "อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นระนาบจะเป็นสัดส่วนโดยตรง กับความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังทั้งสองด้าน และพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน แต่จะเป็นส่วนกลับกับความหนาของชั้นระนาบ"



รูปที่ 2.3 การนำความร้อนผ่านผนังระนาบขนาดใหญ่ [7]

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการนำความร้อนกับ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ พื้นที่ผิวในการนำความร้อน และความหนาของชั้นระนาบเป็นดังนี้

$$\dot{Q}_{cond} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

ซึ่งจะได้

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (\text{W}) \quad (2.4)$$

โดยที่ค่าคงที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของแต่ละวัสดุ โดยจะเป็นการวัดความสามารถของวัสดุในการนำความร้อน เมื่อ $\Delta X \rightarrow 0$ จะได้สมการอยู่ในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{dT}{dX} \quad (\text{W}) \quad (2.5)$$

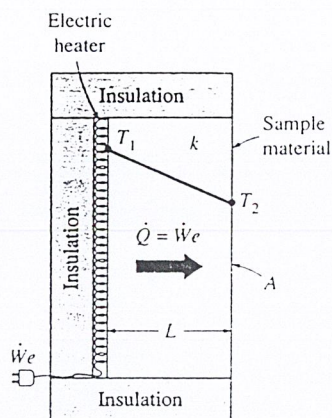
เรียกสมการนี้ว่า Fourier's law of heat conduction โดย dT/dx คือ แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ซึ่งจะเป็นความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาที่ตำแหน่ง x ใดๆ และแกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าเป็นลบ เนื่องจากอุณหภูมิจะลดลงเมื่อค่า x เพิ่มขึ้น สำหรับพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน A จะต้องเป็นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายเทความร้อน

จากสมการที่ 2.4 แสดงสมการอัตราการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว ซึ่งจะสามารถให้นิยามค่าการนำความร้อนจากสมการนี้ได้ว่า “ค่าการนำความร้อนของวัสดุ คือ อัตราการนำความร้อนผ่าน 1 หน่วยความหนาของวัสดุ ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ ต่อ 1 หน่วยความแตกต่างของอุณหภูมิ “ ค่าการนำความร้อนของวัสดุจะเป็นตัววัดว่า ความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุมีความเร็วเท่าใด โดยเมื่อค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่ามากจะเป็นตัวชี้ว่า วัสดุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ดี และถ้าค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำ จะชี้ว่าวัสดุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี หรือเป็นฉนวนกันความร้อน ในตารางที่ 2.1 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง [7]

| Material | k, (W/m ^o C) |
|----------------------|-------------------------|
| Diamond | 2300 |
| Silver | 492 |
| Copper | 401 |
| Gold | 317 |
| Aluminum | 237 |
| Iron | 80.2 |
| Mercury (l) | 8.54 |
| Glass | 0.78 |
| Brick | 0.72 |
| Water (l) | 0.613 |
| Human skin | 0.37 |
| Polyethylene | 0.33 |
| Wood (oak) | 0.17 |
| Soft rubber | 0.13 |
| Glass fiber | 0.043 |
| Air (g) | 0.026 |
| Urethane, rigid foam | 0.026 |

จากรูปที่ 2.4 วัสดุที่เราทราบความหนาและพื้นที่ ซึ่งถูกให้ความร้อนจากด้านหนึ่ง โดยผ่าน ขดลวดความต้านทานซึ่งทราบปริมาณความร้อนที่ให้ออกมา ถ้าเครื่องให้ความร้อนถูกล้อมไว้ด้วย ฉนวนอย่างดี ดังนั้นคิดว่าปริมาณความร้อนทั้งหมดจะถูกถ่ายเทผ่านวัสดุเพียงด้านเดียว ทำให้เราสามารถหาค่าการนำความร้อนของวัสดุนั้นได้โดย ทำการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุ ทั้ง 2 ด้าน เมื่อ ความร้อนถูกถ่ายเทโดยสภาวะคงตัว เราสามารถหาค่าการนำความร้อนได้จากสมการที่ 2.4



$$k = \frac{L}{A(T_1 - T_2)} \dot{Q}$$

รูปที่ 2.4 แบบจำลองอย่างง่ายในการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ[7]

2.2.5. ค่าการแพร่ผ่านความร้อน (Thermal diffusivity)

ค่า ρC_p ของวัสดุในการถ่ายเทความร้อนเรียกว่า ค่าความจุความร้อน (Heat capacity) ของวัสดุ ทั้งความจุความร้อนจำเพาะ C_p และค่าความจุความร้อน ρC_p จะเป็นตัวแทนความสามารถในการเก็บความร้อนของวัสดุ ซึ่ง C_p จะเป็นต่อ 1 หน่วยมวลและ ρC_p จะเป็นต่อ 1 หน่วยปริมาตร

เราสามารถให้นิยามค่าสมบัติของวัสดุซึ่งปรากฏในการวิเคราะห์การนำความร้อน คือ การแพร่ผ่านความร้อน ซึ่งจะเป็นตัวแสดงว่าความร้อนสามารถแพร่ผ่านวัสดุได้เร็วเท่าใด โดย

$$\alpha = \frac{\text{ความร้อนที่ถูกนำ}}{\text{ความร้อนที่ถูกเก็บไว้}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 ค่าการนำความร้อน k จะบอกความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ และค่าความจุความร้อน ρC_p จะบอกถึงพลังงานที่วัสดุเก็บเอาไว้ว่ามีมากเท่าใดต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้นค่าการแพร่ผ่านความร้อนจะอยู่ในรูปอัตราส่วนของความร้อนที่ถูกนำผ่านวัสดุนั้น ต่อความร้อนที่ถูกเก็บไว้ต่อหน่วยปริมาตร

ค่าการแพร่ผ่านความร้อนเมื่อมีค่าสูงแสดงให้เห็นว่า มีการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางได้เร็ว และถ้าค่าการแพร่ผ่านความร้อนมีค่าต่ำ หมายความว่าความร้อนส่วนใหญ่จะถูกเก็บไว้โดยวัสดุ และมีความร้อนปริมาณเล็กน้อยที่ถูกนำผ่านไป

2.3. วัสดุปูพื้น (Flooring) [8]

ขอบเขตของวัสดุปูพื้นเพิ่มขึ้นตามจำนวนชนิดของพอลิเมอร์ที่มีมากขึ้นทุกวันในท้องตลาด นอกจากวัสดุปูพื้นที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแล้ว (เช่น กระเบื้องเซรามิก แผ่นไม้ พื้นหินขัด หินอ่อน ยางมะตอย เลื่อนน้ำมัน เป็นต้น) วัสดุใหม่ๆ ก็ได้ถูกนำมาใช้เช่นเดียวกัน เช่น กระเบื้องพีวีซี ไวนิลคลอไรด์-ไวนิลเอซิเตตโคพอลิเมอร์ (Vinyl chloride-vinyl acetate copolymer) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) พอลิยูรีเทน (Polyurethane)

สมบัติของวัสดุปูพื้นที่สำคัญที่ควรพิจารณาก่อนเลือกใช้คือ สมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความต้านแรงกระแทก ความต้านแรงดึง ร้อยละการยืดออก ณ จุดขาด มอดูลัสการยืดหยุ่น ความแข็ง นอกจากนี้ยังพิจารณาสมบัติอื่นๆ เช่น การดูดซับน้ำ ความหนาแน่น ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมและสารเคมี เป็นต้น

2.3.1. วัสดุปูพื้นพีวีซี (PVC flooring)

กระเบื้องพีวีซีถูกพบว่าเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดในการนำมาใช้เป็นวัสดุปูพื้น ในขณะที่วัสดุชนิดอื่น (ไม่รวมหินอ่อน) แม้จะมีช่วงราคาใกล้เคียงกัน แต่ก็จะมากกว่าวัสดุชนิดนี้อยู่ถึงร้อยละ 20-50

ลักษณะเด่นของพีวีซีเกือบทั้งหมดนั้นจะมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการนำมาใช้เป็นวัสดุปูพื้น มีเพียงไม่กี่ลักษณะเท่านั้นที่พบว่าไม่เหมาะสม

วัสดุปูพื้นจากพีวีซีนั้นในบางโอกาสอาจเกิดความเสียหายจากการเปราะ หดตัว และแตกหักได้ภายใต้การใช้งานในสภาวะที่หนักเกินไป (ผลกระทบบางอย่างเหล่านี้ถูกให้เหตุผลว่ามาจากการใช้สารทำความสะอาดที่เป็นตัวทำละลายแบบเจล (Solvent-gel cleaners) และ สารทำความสะอาดที่แรงเกินไป) อย่างไรก็ตาม วัสดุปูพื้นพีวีซีจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงพยาบาล โรงเรียน ห้องครัว และห้องน้ำภายในบ้าน ซึ่งวัสดุปูพื้นพีวีซีจะมีรูปแบบและสีให้เลือกอย่างหลากหลาย ทำความสะอาดได้ง่าย มีความนุ่ม เป็นฉนวน และมีราคาที่เหมาะสม (สมบัติ 3 ประการสุดท้ายทำให้วัสดุปูพื้นพีวีซีมีข้อได้เปรียบเลื่อน้ำมัน)

2.3.2. วัสดุปูพื้นพอลิโพรไพลีน (Polypropylene flooring)

แผ่นพอลิโพรไพลีนถูกพบว่ามีความสามารถในการนำไปใช้งานได้หลายด้าน เป็นพื้นที่ง่ายต่อการทำความสะอาด เพิ่มความสะอาดสบายและความปลอดภัยให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน วัสดุปู

พื้นที่จากพอลิโอไฟโรว์ไฟลีนจะทนต่อการกัดกร่อนและ การถูกทำลายทางชีวภาพ (Biological attack) ในการนำไปใช้ ผิวด้านบนของวัสดุปูพื้นจะถูกทำให้มีลักษณะเป็นร่องเพื่อกันน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

การทดลองในโครงการนี้ เป็นการทำวัสดุประกอบจากพอลิเอทิลีนที่ได้จากการนำขวดพอลิเอทิลีนใช้แล้วมาเจือด้วยเศษหนังสือรีไซเคิลจากโรงงานฟอกหนัง แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

3.1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้

3.1.1. เศษหนังสือรีไซเคิลจากโรงงานฟอกหนัง

3.1.2. ขวดน้ำพลาสติกขุ่น (พอลิเอทิลีน)

3.2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1. เครื่องตัดย่อยพลาสติก (Grinder)

3.2.2. เครื่องผสมและทำเม็ดพลาสติกแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder)

3.2.3. เครื่องบดพลาสติกแบบลูกกลิ้งคู่ (Two-roll mill)

3.2.4. ตู้อบแบบร้อน MEMMERT รุ่น UM 500

3.2.5. เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบอัดด้วยความร้อน (Compression machine)

3.2.6. เครื่องตัดชิ้นงาน

3.2.7. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยคอมพิวเตอร์และโปรแกรม WINDAP :

Lloyd Instrument Ltd.

3.2.8. เครื่องทดสอบความต้านแรงกระแทกของ Yasuda 199311

3.2.9. เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer)

3.2.10. เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ

3.2.11. เครื่องทดสอบการนำความร้อนแบบ Guarded-Hot-Plate

3.2.12. เวอร์เนียร์

3.2.13. ไมโครมิเตอร์

3.2.14. เครื่องชั่ง

3.2.15. แม่พิมพ์อัดร้อน

3.2.16.แม่พิมพ์สำหรับตัดชิ้นงาน

3.2.17.อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับน้ำ

3.3. วิธีการทดลอง

การผสมพอลิเอทิลีนกับเศษหนังสัตว์ สำหรับในโครงการนี้ได้ทำการผสมด้วยกัน 2 วิธี คือ

3.3.1. การผสมพลาสติกด้วยเครื่องเอ็กทราเดอร์

1. นำขวดน้ำพลาสติกที่ได้จากการรวบรวมไว้ไปทำการตัดย่อยด้วยเครื่องตัดย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กประมาณเมล็ดข้าวโพด

2. ทำการผสมพลาสติกที่ได้ทำการตัดย่อยแล้วกับเศษหนังสัตว์ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อไปนี้ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50

3. นำส่วนผสมแต่ละอัตราส่วนเข้าเครื่องเอ็กทราเดอร์ เพื่อผสมให้เข้ากันดี และทำเป็นเม็ด (Granule)

4. เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปจะต้องมีการหล่อเย็นโดยใช้น้ำ เพื่อให้พลาสติกแข็งตัว จึงเป็นเหตุให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความชื้นอยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องนำไปเข้าตู้อบเพื่อทำให้แห้งเพราะความชื้นนี้อาจจะเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นรา และทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นเปลี่ยนแปลง

จากที่ได้ทำการทดลองการผสมพลาสติกด้วยวิธีนี้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างใหม่ ซึ่งอาจทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลง จึงได้เปลี่ยนวิธีการผสมพลาสติกมาเป็นการผสมโดยใช้เครื่องบดลูกกลิ้งคู่

3.3.2. การผสมพลาสติกด้วยเครื่องบดลูกกลิ้งคู่

1. นำส่วนผสมของพลาสติกที่ได้ทำการตัดย่อยแล้วกับเศษหนังสัตว์ที่อัตราส่วนต่างๆ เข้าเครื่องบดลูกกลิ้งคู่ เพื่อให้ผสมเข้ากันดี

2. เนื่องจากพลาสติกที่ได้จากการผสมจากเครื่องบดลูกกลิ้งคู่ จะมีลักษณะเป็นก้อน จึงต้องนำไปตัดย่อยให้มีขนาดเล็กโดยใช้เครื่องตัดย่อยพลาสติก สังเกตลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

3. นำพลาสติกที่ได้ทำการผสมแล้วไปทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น (Sheet) ด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบอัดด้วยความร้อน

3.4. การทดสอบ

3.4.1. สมบัติเชิงกล

1. ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ความต้านแรงดึง ร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) มอดุลัสการยืดหยุ่น (Tensile modulus) โดยใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D 638 [9] ทำการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการอัดด้วยความร้อน โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 8 ชิ้น

สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ

| | | |
|--------------|-----|--------|
| Load cell | 30 | kN |
| Test speed | 100 | mm/min |
| Cell class | 0.5 | |
| Guage length | 25 | mm |

2. ความต้านแรงกระแทก (Impact strength)

ทำการทดสอบโดยเครื่อง Yasuda 199311 ตามมาตรฐาน ASTM D 256 Method a (Izod type) [10] ทำการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการอัดด้วยความร้อน โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น

3. ความแข็ง (Hardness)

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Durometer hardness ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 วัดโดย Shore D [11] ลักษณะของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีผิวเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร กดเป็นเวลา 15 วินาทีจึงสามารถอ่านค่าได้

3.4.2. การนำความร้อน

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการนำความร้อนแบบ Guarded-Hot-Plate ตามมาตรฐาน ASTM C 177 [12] โดยทำการเตรียมชิ้นงานโดยขึ้นรูปแบบอัดด้วยความร้อน ซึ่งจะมีขนาด 1 ฟุต x 1 ฟุต และมีความหนาอยู่ในช่วง 0.5 – 2 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น

3.4.3. การดูดซับน้ำและการละลายในน้ำ (Water absorption and Water solubility)

1. นำชิ้นงานขนาด $1.3 \times 3.2 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นมาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก ก่อนการดูดซับน้ำ

3. นำชิ้นงานมาแช่ในภาชนะปิด ที่อุณหภูมิห้อง

4. หลังจากนั้น 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักหลังจากการดูดซับน้ำ โดยทำเช่นนี้ทุกวันจนกว่าน้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งนั้นมีค่าคงที่

5. นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณร้อยละการดูดซับน้ำ

$$W_a = ((W_e - W_o) / W_o) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ W_a = ร้อยละการดูดซับน้ำ

W_e = น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

W_o = น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

6. นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำแล้ว มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันกับ การอบแห้งในข้อที่ 1

7. นำชิ้นงานในข้อที่ 7 ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละการละลายในน้ำ

$$S = ((W_i - W_f) / W_i) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ S = ร้อยละการละลายในน้ำ

W_i = น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งครั้งที่ 1

W_f = น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งครั้งที่ 2

3.4.4. การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

นำชิ้นงานไปทำการแทนที่น้ำโดยใช้เครื่องหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity balance) ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 792 [13]

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1. การวิเคราะห์ส่วนผสมของพอลิเอทิลีนที่เจือด้วยเศษหนังสัตว์

ตารางที่ 4.1 ผลการสังเกตเมื่อดมกลิ่นของผสมในอัตราส่วนต่างๆ

| อัตราร้อยละของเศษหนังสัตว์ในพอลิเอทิลีน | ลักษณะของเม็ดพลาสติกผสมที่สังเกตด้วยตาเปล่า |
|---|--|
| 10 | มีสีเทียวอ่อน พอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์รวมเป็นเนื้อเดียวกัน |
| 20 | มีสีเทียวเข้มกว่าที่ร้อยละ 10 พอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์รวมเป็นเนื้อเดียวกัน |
| 30 | มีสีเทียวเข้มกว่าที่ร้อยละ 20 พอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์รวมเป็นเนื้อเดียวกัน |
| 40 | มีสีเทียวเข้มกว่าที่ร้อยละ 30 พอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์รวมเป็นเนื้อเดียวกัน |
| 50 | พอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน |

จากการสังเกตลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมที่อัตราส่วนต่างๆ จะเห็นว่าลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการผสมที่อัตราส่วนเศษหนังสัตว์ร้อยละ 50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อนำไปทำการตัดย่อยแล้วนั้น จะมีการแยกตัวกันระหว่างเศษหนังสัตว์ และพอลิเอทิลีนอย่างเห็นได้ชัด ในที่นี้จึงไม่พิจารณานำเอาอัตราส่วนผสมเศษหนังสัตว์ที่ร้อยละ 50 มาขึ้นรูปชิ้นงาน เนื่องจากเศษหนังสัตว์มีปริมาณมากเกินไปทำให้ไม่สามารถรวมกับพอลิเอทิลีนเป็นเนื้อเดียวกัน

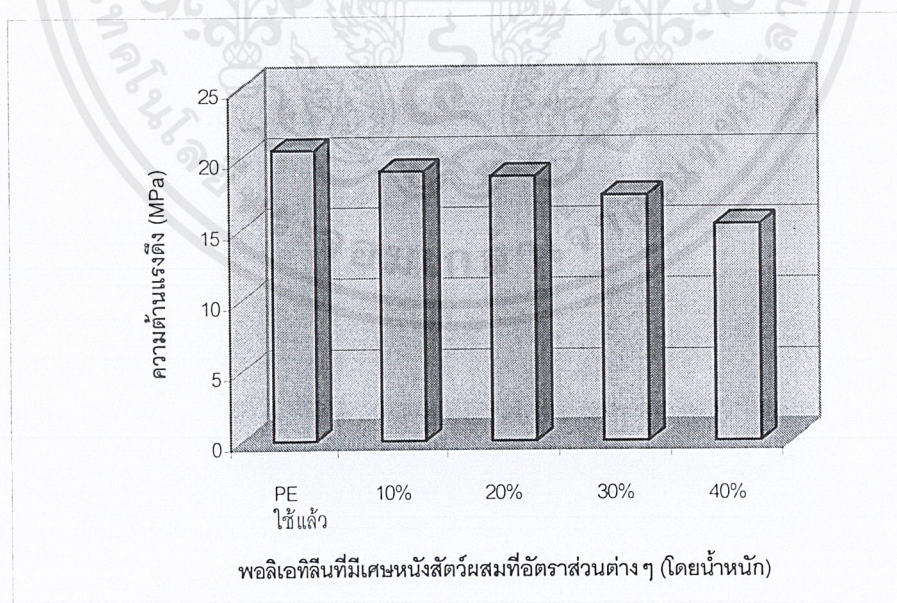
4.2. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

4.2.1. ความต้านแรงดึง

จากการทดลองได้ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ความต้านแรงดึง (MPa) |
|--|----------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 20.58 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนังสัตว์ 10% | 19.07 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนังสัตว์ 20% | 18.73 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนังสัตว์ 30% | 17.35 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนังสัตว์ 40% | 15.31 |



รูปที่ 4.1 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

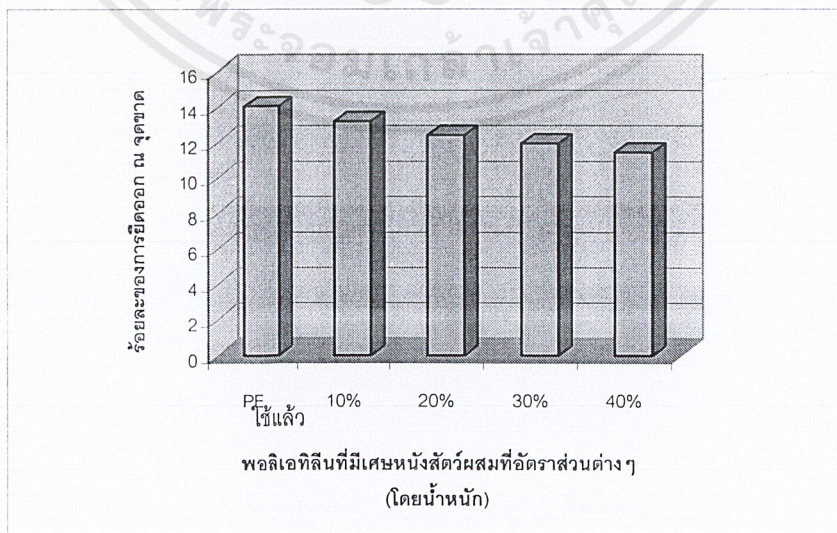
จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่าง พอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ จะเห็นได้ว่าค่าความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนใช้แล้วนั้นมีค่าความต้านแรงดึงมากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ต่างๆ พบว่าค่าความต้านแรงดึงจะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ในวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.2. ค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาด (% Elongation at break)

จากการทดลองได้ค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วยดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาด |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 14.05 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 13.19 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 12.42 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 11.95 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 11.44 |



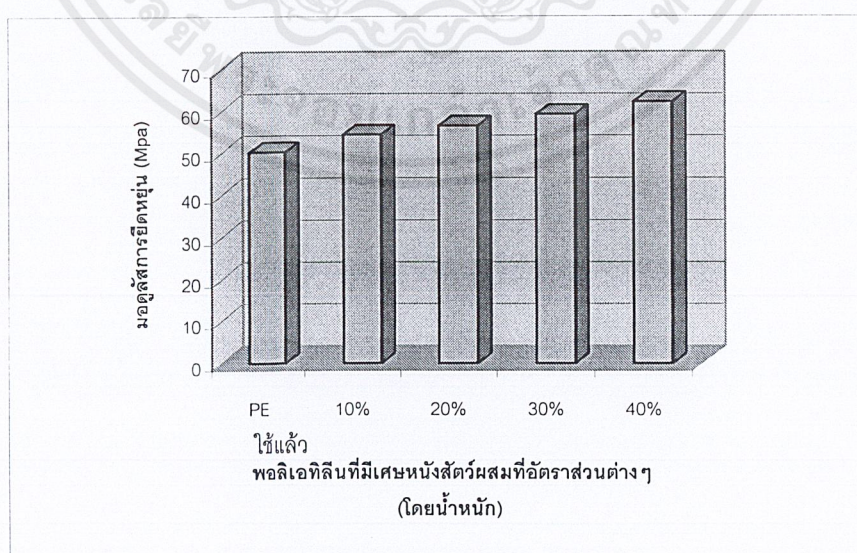
จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาดระหว่างพอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนใช้แล้วนั้นมีค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาดมากกว่าเล็กน้อย และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ต่างๆ พบว่าค่าร้อยละของการยืดออก ณ จุดขาดจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ในวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.3. ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่น

จากการทดลองได้ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วยดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | มอดูลัสการยืดหยุ่น (MPa) |
|-----------------------------------|--------------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 50.27 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 54.43 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 56.53 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 59.27 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 62.24 |



รูปที่ 4.3 ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

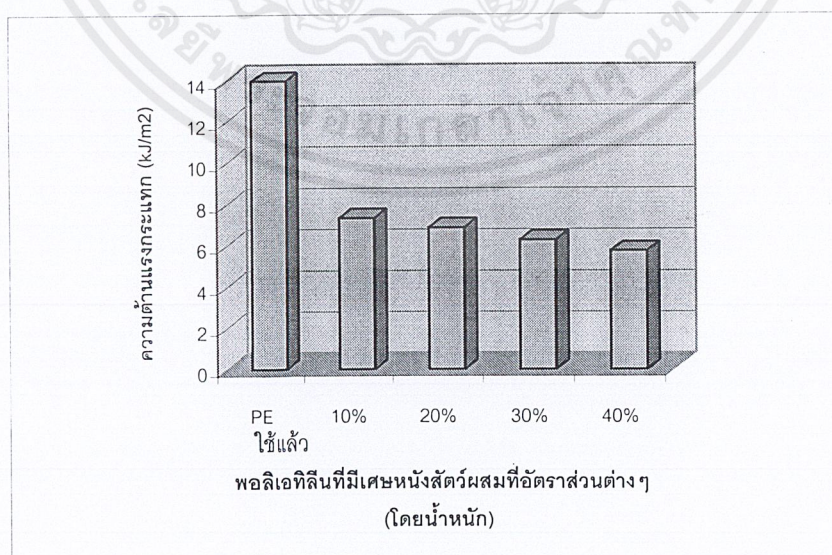
จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นระหว่าง พอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนใช้แล้วนั้นมีค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นน้อยกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่ออัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ในวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.4. ความต้านแรงกระแทก

จากการทดลองได้ค่าความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วย ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ความต้านแรงกระแทก (kJ/m ²) |
|-----------------------------------|--|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 13.98 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 7.34 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 6.87 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 6.27 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 5.75 |



รูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงกระแทกระหว่างพอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนใช้แล้ว มีค่าความต้านแรงกระแทกมากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ต่างๆ พบว่าความต้านแรงกระแทกจะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ในวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น

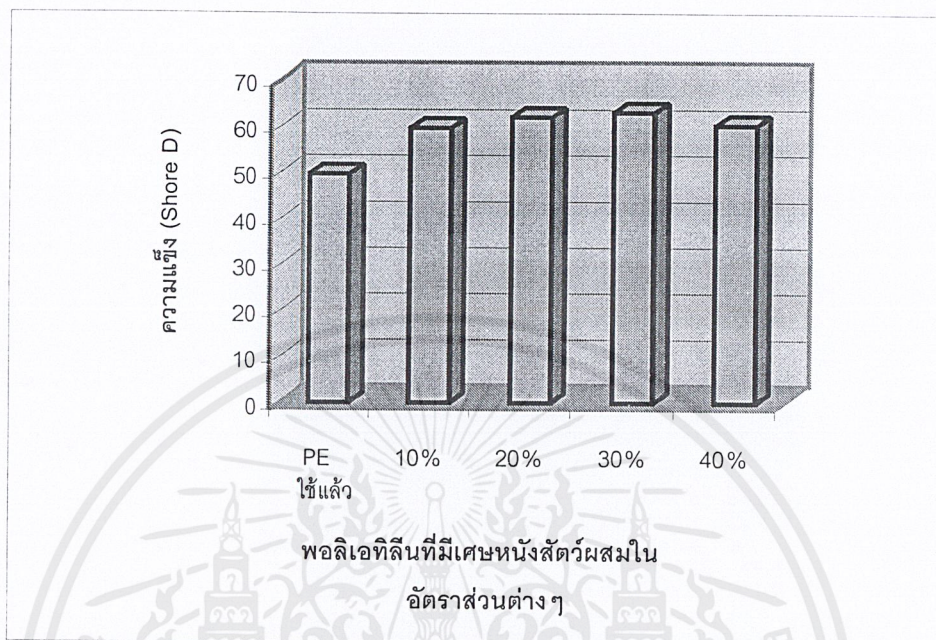
ด้วยเหตุนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเติมเศษหนังสัตว์จะทำให้วัสดุประกอบที่ได้ออกมามีความเปราะ และแตกหักได้ง่าย ส่งผลให้มีแนวโน้มในการรับแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณของเศษหนังสัตว์เพิ่มขึ้น

4.2.5. ความแข็ง (Hardness)

จากการทดลองได้ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วยดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ความแข็ง (Shore D) |
|-----------------------------------|--------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 49.63 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 59.67 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 62.00 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 63.00 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 60.33 |



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

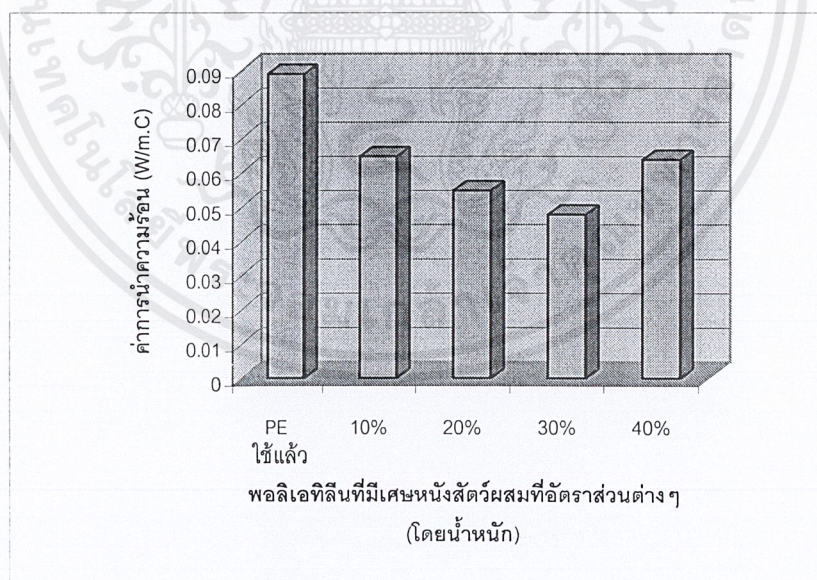
จากผลการทดลองดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนใช้แล้ว กับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ พบว่าพอลิเอทิลีนมีค่าความแข็งน้อยกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ร้อยละ 10 20 30 และ 40 พบว่าค่าความแข็งจะมีค่าใกล้เคียงกัน แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4.3. การวิเคราะห์การนำความร้อน

จากการทดลองได้ค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วย ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ค่าการนำความร้อน (W/m.°C) |
|-----------------------------------|---------------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 0.089 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 0.065 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 0.055 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 0.048 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 0.064 |



รูปที่ 4.6 ค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนใช้แล้วและเศษหนังสัตว์ พบว่าพอลิเอทิลีนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้แล้วมีค่าการนำความร้อนมากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนของเศษหนึ่งส่วนสี่ร้อยละ 10 20 และ 30 ค่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลง และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนร้อยละ 40

สำหรับความต้านทานความร้อนของวัสดุซึ่งจะเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุนั้น ในกรณีนี้วัสดุมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีความหนา 1 เซนติเมตร ดังนั้นสามารถคำนวณหาความต้านทานความร้อนได้จาก สมการที่ 2.1 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนึ่งส่วนสี่ผสม

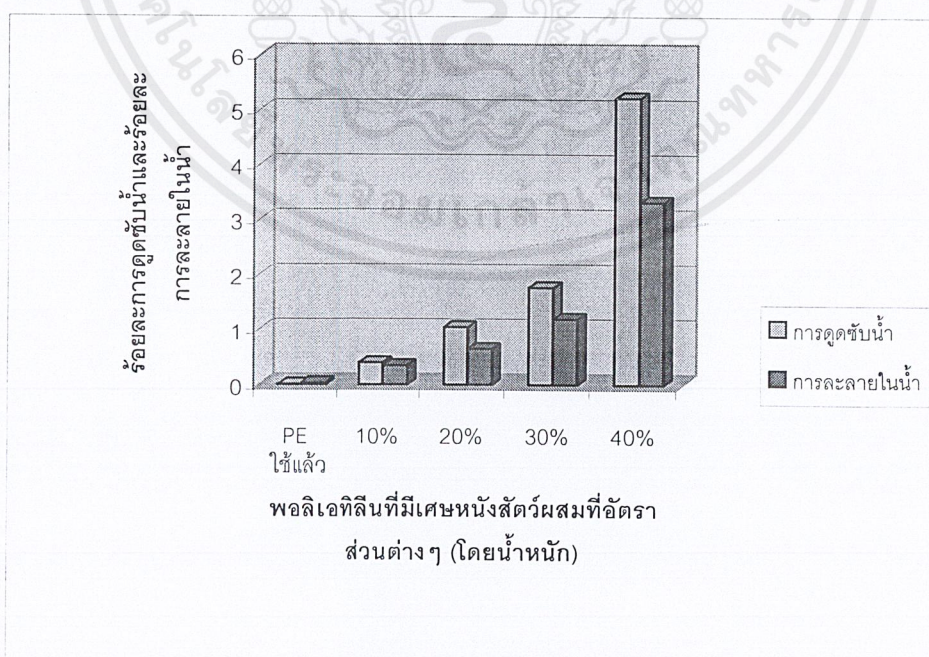
| ชนิดของตัวอย่าง | R-Value (m^2C/W) |
|------------------------------------|----------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 0.112 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนึ่ง 10% | 0.154 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนึ่ง 20% | 0.182 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนึ่ง 30% | 0.208 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนึ่ง 40% | 0.156 |

4.4. การวิเคราะห์การดูดซับน้ำ และการละลายในน้ำ

จากการทดลองสามารถคำนวณค่าร้อยละการดูดซับน้ำ และค่าร้อยละการละลายในน้ำของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วย ได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.9 ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและร้อยละการละลายของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ร้อยละการดูดซับน้ำ | ร้อยละการละลายในน้ำ |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 0.01 | 0.04 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 0.41 | 0.36 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 1.05 | 0.66 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 1.77 | 1.19 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 5.22 | 3.33 |



รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและการละลายในน้ำของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับน้ำของแต่ละชิ้นงาน พบว่าพอลิเอทิลีนจะมีค่าต่ำที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุประกอบที่อัตราส่วนเศษหนึ่งส่วนสี่ตัวต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณอัตราส่วนของเศษหนึ่งส่วนสี่ตัวเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซับน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสมของเศษหนึ่งส่วนสี่ตัวร้อยละ 40 นั้น ค่าร้อยละการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

สำหรับร้อยละการละลายของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนึ่งส่วนสี่ตัวผสมอยู่ในน้ำ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเศษหนึ่งส่วนสี่ตัวเพิ่มขึ้น

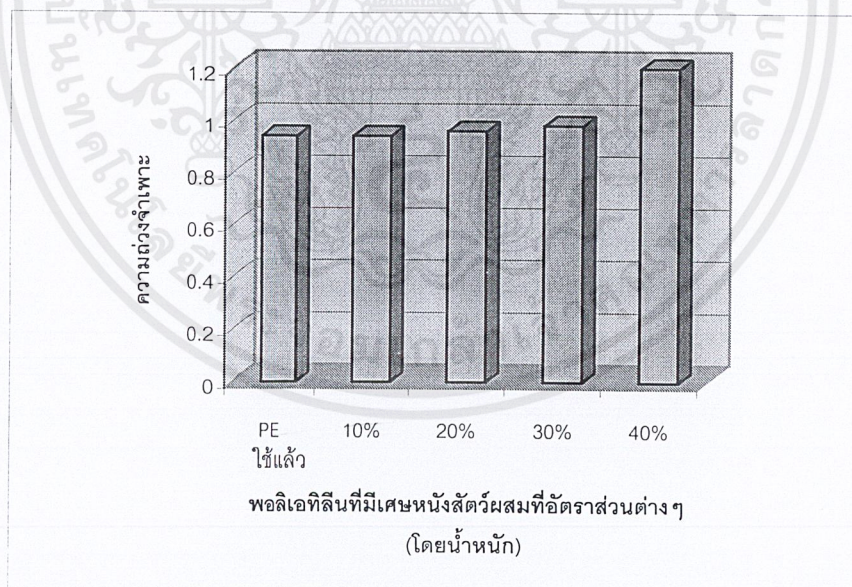


4.5. การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ

จากการทดลองได้ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสมอยู่ด้วย ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

| ชนิดของตัวอย่าง | ความถ่วงจำเพาะ |
|-----------------------------------|----------------|
| พอลิเอทิลีนใช้แล้ว | 0.94 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 10% | 0.94 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 20% | 0.96 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 30% | 0.98 |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนัง 40% | 1.20 |



รูปที่ 4.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนที่มีเศษหนังสัตว์ผสม

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะระหว่างพอลิเอทิลีนใช้แล้วกับวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ จะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเอทิลีนใช้แล้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุประกอบที่อัตราส่วนเศษหนังสัตว์ร้อยละ 10 20 และ 30 แทบไม่มีความแตกต่างกัน แต่ที่อัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ร้อยละ 40 จะมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1. ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัย

โครงการนี้เป็นการทำวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเศษหนังสัตว์ต่างๆ กัน ร้อยละ 10 20 30 และ 40 แล้วนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการความร้อน การดูดซับน้ำ การละลายน้ำ และความถ่วงจำเพาะ

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า วัสดุประกอบที่มีอัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ร้อยละ 10 จะมีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลดีที่สุด กล่าวคือ วัสดุประกอบจะสามารถทนทานต่อแรงดึง แรงกระแทก ได้ดีที่สุด สำหรับแนวโน้มของสมบัติการนำความร้อนนั้น วัสดุประกอบที่มีอัตราส่วนของเศษหนังสัตว์ร้อยละ 30 จะมีค่าการนำความร้อนต่ำสุด แสดงให้เห็นว่าวัสดุในอัตราส่วนดังกล่าวจะมีสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ

และสามารถสรุปผลของปริมาณเศษหนังสัตว์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบได้ดังต่อไปนี้

5.1.1. ผลของปริมาณเศษหนังสัตว์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

เศษหนังสัตว์จะมีผลทำให้วัสดุประกอบมีความต้านแรงดึง ร้อยละของการยืดออก อนุจุดขาด และความต้านแรงกระแทกลดลง ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก การมีอยู่ของเศษหนังสัตว์ในวัสดุประกอบจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนสามารถยึดเกาะกันได้น้อยลง ทำให้วัสดุประกอบมีความเหนียวลดลง และทนต่อแรงกระแทกได้น้อย สำหรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น แสดงให้เห็นว่า วัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์จะมีความแข็งเกร็งมากขึ้น เปราะ และแตกหักได้ง่าย ส่วนผลของเศษหนังสัตว์ที่มีต่อความแข็งจะเห็นว่าเศษหนังสัตว์จะไม่ทำให้ความแข็งของวัสดุประกอบเปลี่ยนแปลงมากนัก

5.1.2. ผลของปริมาณเศษหนังสัตว์ที่มีต่อการนำความร้อน

เมื่ออัตราส่วนของเศษหนังสัตว์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก วัสดุประกอบจะมีการนำความร้อนลดลง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะของเศษหนังสัตว์มีความพรุน เมื่อนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนแล้วทำการขึ้นรูปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอากาศอยู่ภายใน และเนื่องจากค่าการนำความร้อนของอากาศมีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนรวมของวัสดุประกอบระหว่างเศษหนังสัตว์และพอลิเอทิลีนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้เห็นไปเสียประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทิลีนมีค่าลดลง แต่เมื่อปริมาณเศษหนึ่งสัตรีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40 การอัดตัวของเศษหนึ่งสัตรีจะเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องว่างอากาศภายในลดลงส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองหาความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่ออัตราส่วนของเศษหนึ่งสัตรีเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 40

5.1.3. ผลของปริมาณเศษหนึ่งสัตรีที่มีต่อสมบัติการดูดซับน้ำและการละลายน้ำ

การทำวัสดุประกอบโดยมีเศษหนึ่งสัตรีเป็นส่วนประกอบมีผลทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษหนึ่งสัตรีมีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีนแบบเส้นใยซึ่งช่วยในการดูดซับน้ำ สำหรับการละลายน้ำที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเศษหนึ่งสัตรีเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพอลิเอทิลีนและเศษหนึ่งสัตรี ที่ทำให้มีเศษหนึ่งสัตรีบางส่วนหลุดออกไปในขณะนำไปทำการแช่น้ำ

5.1.4. ผลของปริมาณเศษหนึ่งสัตรีที่มีต่อความถ่วงจำเพาะ

การเพิ่มปริมาณเศษหนึ่งสัตรีในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 แทบไม่มีผลต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุประกอบ แต่ที่อัตราส่วนของเศษหนึ่งสัตรีร้อยละ 40 พบว่าความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากที่วัสดุประกอบที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 จะมีช่องอากาศอยู่มาก แต่เมื่อปริมาณเศษหนึ่งสัตรีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40 การอัดตัวของเศษหนึ่งสัตรีจะเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องว่างอากาศภายในลดลงส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น

5.2. ข้อเสนอแนะ

สำหรับการพัฒนาส่วนเพิ่มเติมจะมีแนวทางดังต่อไปนี้

5.2.1. การพัฒนาเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้น

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและ
เศษหนังสัตว์กับวัสดุปูพื้นที่พบในตลาด [14]

| สมบัติ | พอลิเอทิลีน | พอลิโพรไพลีน | พีวีซี | วัสดุประกอบพอลิเอทิลีน และเศษหนังสัตว์ |
|--|-------------|--------------|---------|---|
| ความต้านแรงดึง (MPa) | 25.52 | 33.78 | 41.37 | 15-19 |
| ร้อยละการยืดออก ณ จุดขาด | 660 | 200 | 140 | 11-13 |
| มอดุลัสการยืดหยุ่น (MPa) | 965.71 | 1448.57 | 2379.79 | 54-63 |
| ความต้านแรง กระแทก (kJ/m ²) | 13.66 | 8.82 | 2.10 | 5-8 |
| ความแข็ง (Shore D) | 70 | 75 | 70 | 59-63 |
| ร้อยละการดูดซับน้ำ | < 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.4-5.3 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.95 | 0.91 | 1.33 | 0.94-1.2 |

จากตารางที่ 5.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบจากการทดลองกับวัสดุปูพื้นที่มีขายในตลาด พบว่าความต้านแรงดึงของวัสดุประกอบนั้นมีค่าน้อยกว่าวัสดุปูพื้นที่มีขายในตลาด สำหรับร้อยละการยืดออก ณ จุดขาด และมอดุลัสการยืดหยุ่นนั้น วัสดุประกอบจะมีค่าต่ำกว่ามาก ส่วนความแข็ง และความถ่วงจำเพาะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับร้อยละการดูดซับน้ำนั้น วัสดุประกอบจะมีค่าสูงกว่าวัสดุปูพื้นมาก ดังนั้นวัสดุประกอบจากโครงการนี้จึงยังไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปูพื้น ควรมีการปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมโดยอาจนำไปผสมกับสารเติมแต่ง เช่น สเตบิลไอเซอร์ หรือฟลาสติไซเซอร์ เพื่อให้เกิดความคงทนต่อเอกสาร เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อม และมีสมบัติเชิงกลเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ก็นำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ

5.2.2. การพัฒนาเพื่อนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบสมบัติบางประการของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ สัตว์กับฉนวนกันความร้อนที่พบในตลาด

| สมบัติ | พอลิเอทิลีนโฟม [15] | พอลิยูรีเทนโฟม [16] | วัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและ เศษหนังสัตว์ |
|--|--------------------------|--------------------------|---|
| ค่าการนำความร้อน (W/m ^o C) | 0.024 | 0.016-0.018 | 0.05-0.07 |
| ความต้านแรงดึง (Mpa) | 0.21 | - | 15-19 |
| ร้อยละการดูดซับน้ำ | < 2 | - | 0.4-5.3 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.03-0.05 | 0.034 | 0.94-1.2 |

จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.05 - 0.8 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส [7] ซึ่งค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบที่ได้ทำการทดสอบจะมีค่าอยู่ในช่วงนี้ แต่จากตารางที่ 5.2 เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบกับฉนวนกันความร้อนที่มีขายในท้องตลาดในปัจจุบัน พบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบยังมีค่าสูงอยู่ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะจะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประกอบมีค่าสูงกว่าฉนวนกันความร้อนที่ขายในท้องตลาดอยู่มาก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักของชิ้นงาน เพื่อนำไปใช้งานจริง โดยจากตารางที่ 2.1 ยกตัวอย่างเมื่อต้องการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิ 66 องศาเซลเซียส ความหนาของฉนวนกันความร้อนที่แนะนำให้ใช้จะมีค่าเท่ากับ 5.1 เซนติเมตร และหากต้องการขนาด 30 x 30 ตารางเซนติเมตร พบว่าวัสดุจากการทดลองนี้จะมีน้ำหนักประมาณ 4.5 กิโลกรัม และถ้าเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนโฟมที่มีสมบัติดังตารางที่ 5.2 ที่มีขนาดและความหนาเท่ากัน จะมีน้ำหนักเพียง 0.13 กิโลกรัมเท่านั้น จะเห็นว่าวัสดุประกอบจากการทดลองนี้จะมีน้ำหนักสูงกว่ามาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน จึงต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พยายามหาวิธีปรับปรุงสมบัติ เช่น การเติมสารเกิดฟอง (Foaming agent) จะช่วยเพิ่มปริมาณของอากาศภายในชิ้นงานซึ่งจะมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง และยังทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเบาขึ้นด้วย และนอกเหนือจากนี้ต้องพิจารณาถึงการนำไปประยุกต์ใช้ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ได้แก่ งานที่ไม่ต้องการความหนาของฉนวนมากนัก ยกตัวอย่าง การนำไปใช้บุผนังห้องในที่อยู่อาศัยซึ่งจะใช้ฉนวนที่มีความหนาไม่มาก โดยทั่วไปจะใช้ที่ความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร [15] ก็จะทำให้วัสดุประกอบจากทดลองมีน้ำหนักลดลง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงสมบัติที่สำคัญในด้านอื่นๆ อีก เช่น ความแข็งแรงทางด้านโครงสร้าง อุณหภูมิที่ใช้งาน เป็นต้น

5.2.3. การศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นเมตริกซ์เป็นพอลิเมอร์ชนิดอื่น

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ กับวัสดุประกอบพอลิเมอร์ชนิดอื่น

| สมบัติ | ชนิดของวัสดุประกอบพอลิเมอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุภาคกระจายตัว) | | | | |
|--|--|-----------------------------|--|--|-----------------------------|
| | PE+PP และเส้นใยอ้อย (5%) [2] | PP และเส้นใยอ้อย (10%) [17] | PE และเศษกระดาษหนังสือพิมพ์ (20%) [18] | PP และเศษกระดาษหนังสือพิมพ์ (20%) [18] | PE และเศษหนังสัตว์ (10-40%) |
| ความต้านแรงดึง (MPa) | 26.14 | 30.82 | 22.07 | 26.39 | 15-19 |
| ร้อยละการยืดออก ณ จุดขาด | 51.38 | 7.33 | - | - | 11-13 |
| มอดูลัสการยืดหยุ่น (MPa) | 297 | 390 | 213.37 | 272.23 | 54-63 |
| ความต้านแรงกระแทก (kJ/m ²) | 12.8 | 3.37 | 6.09 | 5.25 | 5-8 |
| ความแข็ง (shore D) | 62.63 | - | - | - | 59-63 |
| ร้อยละการดูดซับน้ำ | 0.303 | - | 0.42 | 0.16 | 0.4-5.3 |

จากตารางที่ 5.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเอทิลีนและเศษหนังสัตว์ กับวัสดุประกอบพอลิเมอร์ที่มีสมบัติของภูมิภาคเมตริกซ์ใกล้เคียงกัน แต่มีภูมิภาคกระจายตัวต่างกัน จะเห็นว่าสมบัติที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีบางค่าที่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่น และค่าร้อยละการยืดออก ณ จุดขาด ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมบัติที่แตกต่างกันของภูมิภาคกระจายตัว ดังนั้น ในการศึกษาเพิ่มเติมอาจทำได้โดยทำการเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นภูมิภาคเมตริกซ์ เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพื้นซึ่งต้องการสมบัติด้านความยืดหยุ่น อาจเปลี่ยนภูมิภาคเมตริกซ์เป็นพีวีซี เนื่องจากพีวีซีสามารถปรับความยืดหยุ่นได้ในช่วงกว้าง ตั้งแต่อ่อนนุ่มมากไปจนถึงมีความแข็งคงตัว

5.2.4. การศึกษาผลของสารเติมแต่ง

เช่น สารเกิดฟอง อาจจะมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนและความหนาแน่น มีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะใด

5.2.5. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง

ควรมีการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของวัสดุประกอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เอกสารอ้างอิง

1. Schwartz, Mel M., "Composite Materials (Volume 1)", Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1997.
2. จิรพรรณ นายคอน และมารีสา ตันติลักษณ์, "วัสดุคอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยอ้อย", ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
3. ดร.วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล, "ความรู้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและการพัฒนาอุตสาหกรรมปิโตรเคมีภายในประเทศ", สำนักพิมพ์ เดียร์บุ๊ก, กทม., 2535
4. มนตรี บุญชู และสมชาย เอี่ยมเจริญ, "การออกแบบโมลด์ฉีดพลาสติก", วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา, 2529
5. สิริภค สระตันติ, "ซีวเคมีเบื้องต้น", ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
6. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมพอกหนัง", โรงพิมพ์สำนักเลขาธิการรัฐมนตรี, 2541
7. Çengel, Yunus A., "Heat Transfer, A Practical Approach", McGraw-Hill, New York, 1998.
8. Feldman, Dorel, "Polymeric Building Material", Elsevier applied science, London and New York, 1989.
9. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM D 638-91, 1992, pp.159-171.
10. *Standard Test Method for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Material*, ASTM D 256-90b, 1992, pp.58-74.
11. *Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*, ASTM D 2240-91, 1992 pp.226-229.
12. *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, ASTM C 177-85, 1992, pp.20-31.
13. *Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*, ASTM D 792-91, 1992, pp.288-291.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

14. <http://www.atlasmin.com>
15. บริษัท มิคเซล จำกัด, “เอกสารแนะนำสินค้า Super-Emboss insulation”, สมุทรปราการ
16. ห้างหุ้นส่วนจำกัด B.H.G. limited partnership, “เอกสารแนะนำสินค้า พอลิยูรีเทนโฟม”, กรุงเทพมหานคร
17. นันทพร พันธุ์ภักดี และ เรวดี สกุลอารียะ, “วัสดุคอมพอสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยอ้อย”, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
18. Jungil Son, Hyun-Jooong Kim, Phil-Woo Lee, *Role of Paper Sludge Particle Size and Extrusion Temperature on Performance of Paper Sludge-Thermoplastic Polymer Composites*, Laboratory of Wood-Based Composites & Adhesion Science, School of Biological Resources & Materials Engineering, Seoul National University, South Korea, 2001.

ภาคผนวก

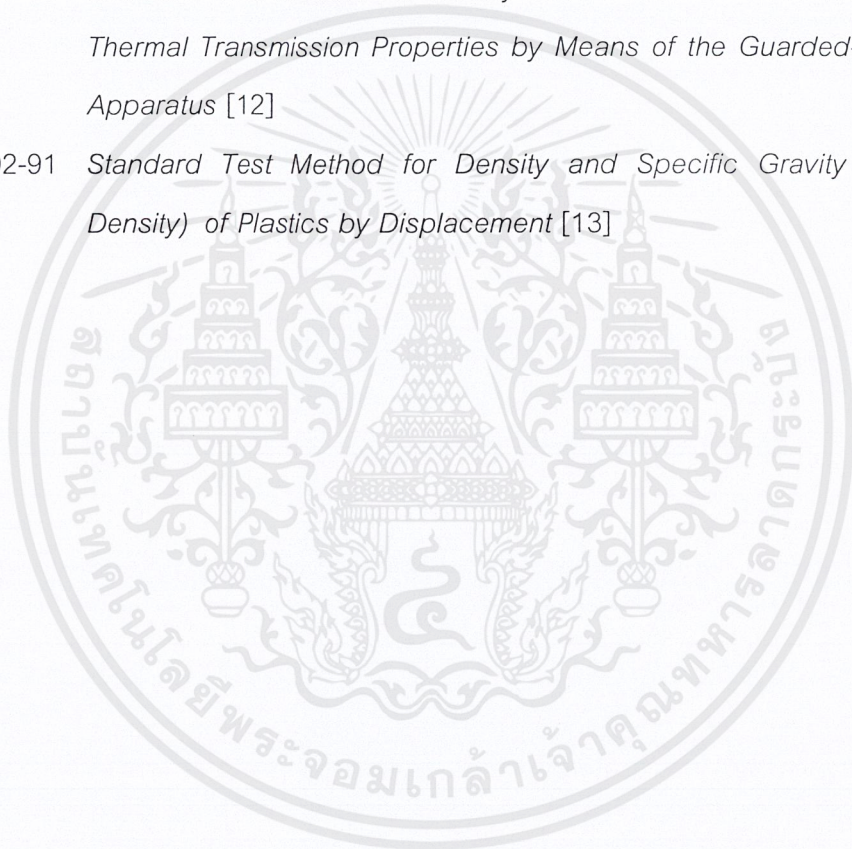
ASTM D 638-91 *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* [9]

ASTM D 256-90b *Standard Test Method for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Material* [10]

ASTM D 2240-91 *Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness* [11]

ASTM C 177-85 *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus* [12]

ASTM D 792-91 *Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* [13]





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 Sheeting⁴
- 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.

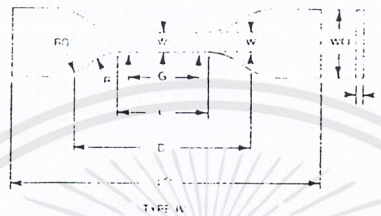
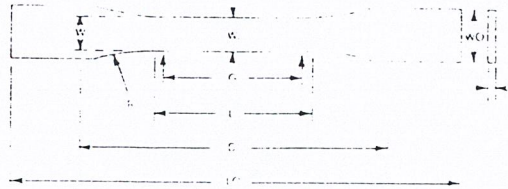
5.1.4 *Drive Mechanism*—A drive mechanism for imparting to the movable member a uniform, controlled velocity with respect to the stationary member, with this velocity to be regulated as specified in Section 9.

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



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 ^F | |
| <i>W</i> —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} |
| <i>L</i> —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 |
| <i>WO</i> —Width over-all, min ^E | 0.75 (19) | 0.75 (19) | 1.13 (29) | 0.75 (19) | ... | +0.25 (+6.4) |
| <i>WO</i> —Width over-all, min ^E | ... | ... | ... | ... | 0.375 (9.53) | +0.125 (+3.18) |
| <i>LO</i> —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) |
| <i>G</i> —Gage length ^C | 2.00 (50) | 2.00 (50) | 2.00 (50) | ... | 0.300 (7.62) | ±0.010 (±0.25) ^I |
| <i>G</i> —Gage length ^C | ... | ... | ... | 1.00 (25) | ... | ±0.005 (±0.13) |
| <i>D</i> —Distance between grips | 4.5 (115) | 5.3 (135) | 4.5 (115) | 2.5 ^H (64) | 1.0 (25.4) | ±0.2 (±5) |
| <i>R</i> —Radius of fillet | 3.00 (76) | 3.00 (76) | 3.00 (76) | 0.56 (14) | 0.5 (12.7) | ±0.04 (±1) ^I |
| <i>RO</i> —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.

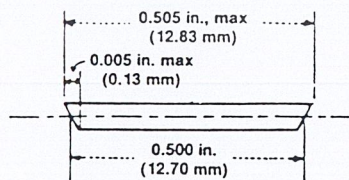
^D Thickness, *T*, shall be 0.13 ± 0.02 in. (3.2 ± 0.4 mm) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, *T*, may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated 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 ± 0.001 in. (3.18 ± 0.03 mm),
- L* = 0.375 ± 0.003 in. (9.53 ± 0.08 mm),
- G* = 0.300 ± 0.001 in. (7.62 ± 0.02 mm), and
- R* = 0.500 ± 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:

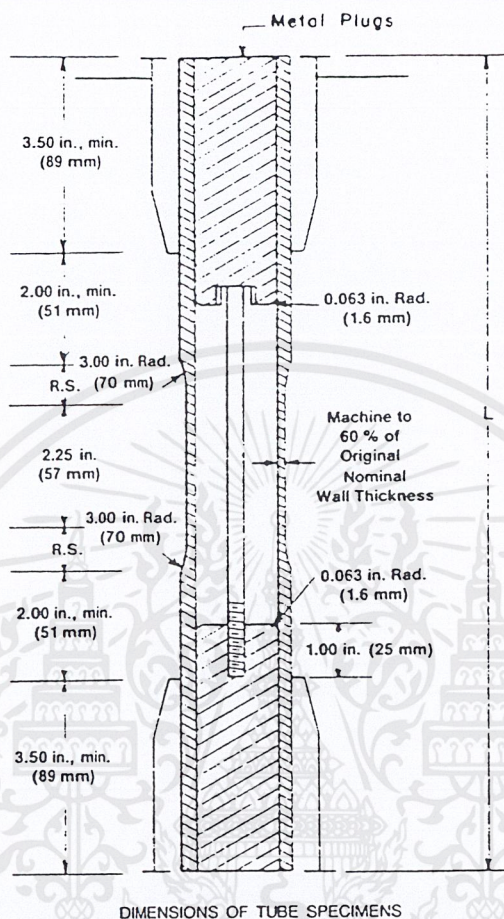
6.2.1 The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60 % of the original nominal wall 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



| 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) | 15 (381) |
| 3/64 (1.2) | 0.670 (17.0) | 13.92 (354) | 15 (381) | 15 (381) |
| 1/16 (1.6) | 0.773 (19.6) | 14.02 (356) | 15 (381) | 15 (381) |
| 3/32 (2.4) | 0.946 (24.0) | 14.20 (361) | 15 (381) | 15 (381) |
| 1/8 (3.2) | 1.091 (27.7) | 14.34 (364) | 15 (381) | 15 (381) |
| 3/16 (4.8) | 1.333 (33.9) | 14.58 (370) | 15 (381) | 15 (381) |
| 1/4 (6.4) | 1.536 (39.0) | 14.79 (376) | 15.75 (400) | 15.75 (400) |
| 5/16 (7.9) | 1.714 (43.5) | 14.96 (380) | 15.75 (400) | 15.75 (400) |
| 3/8 (9.5) | 1.873 (47.6) | 15.12 (384) | 15.75 (400) | 15.75 (400) |
| 7/16 (11.1) | 2.019 (51.3) | 15.27 (388) | 15.75 (400) | 15.75 (400) |
| 1/2 (12.7) | 2.154 (54.7) | 15.40 (391) | 16.5 (419) | 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.

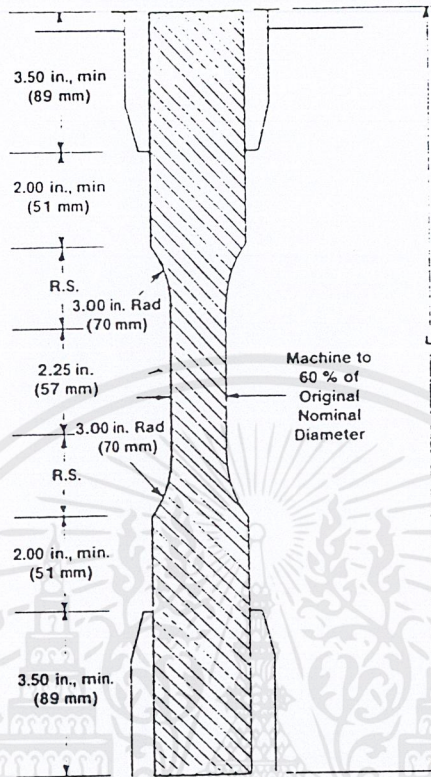
6.6 When testing materials that are suspected of

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, L, of Specimen to be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^A |
|------------------|----------------------------------|---|---|
| | | in. (mm) | |
| ⅛ (3.2) | 0.773 (19.6) | 14.02 (356) | 15 (381) |
| ¼ (6.4) | 0.946 (24.0) | 14.20 (361) | 15 (381) |
| ⅜ (9.5) | 1.091 (27.7) | 14.34 (364) | 15 (381) |
| ½ (12.7) | 1.333 (33.9) | 14.58 (370) | 15 (381) |
| ⅝ (15.9) | 1.536 (39.0) | 14.79 (376) | 15.75 (400) |
| ¾ (19.0) | 1.714 (43.5) | 14.96 (380) | 15.75 (400) |
| 7/8 (22.2) | 1.873 (47.6) | 15.12 (384) | 15.75 (400) |
| 1 (25.4) | 2.019 (51.5) | 15.27 (388) | 15.75 (400) |
| 1¼ (31.8) | 2.154 (54.7) | 15.40 (391) | 16.5 (419) |
| 1½ (38.1) | 2.398 (60.9) | 15.65 (398) | 16.5 (419) |
| 1¾ (42.5) | 2.615 (66.4) | 15.87 (403) | 16.5 (419) |
| 2 (50.8) | 2.812 (71.4) | 16.06 (408) | 16.5 (419) |
| | 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 ^a | 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 % |
| 20 ± 10 % | | | 10 |
| IV | | 2 ± 10 % | 1.5 |
| | | 20 ± 10 % | 15 |

^a Select the lowest speed that produces rupture in 1/2 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 1/2 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 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 | 2660 | 119.1 | 166.3 | 333.6 | 465.6 |

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 | 2.38 | 2.86 | 6.67 |
| 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 |

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 | 270.8 |

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.

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

(Mandatory Information)

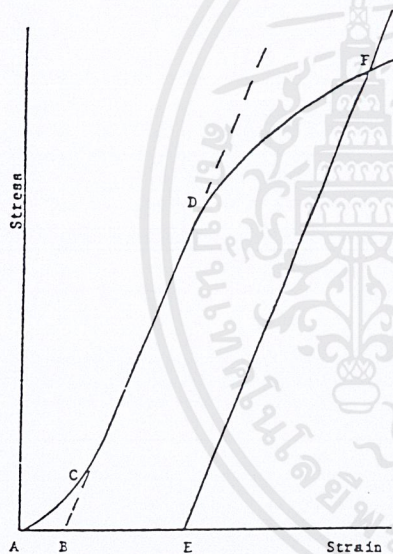
A1. TOE COMPENSATION

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

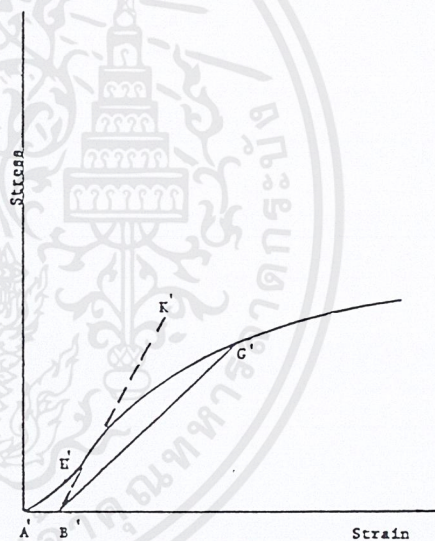
any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from point B , defined as zero-strain).

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

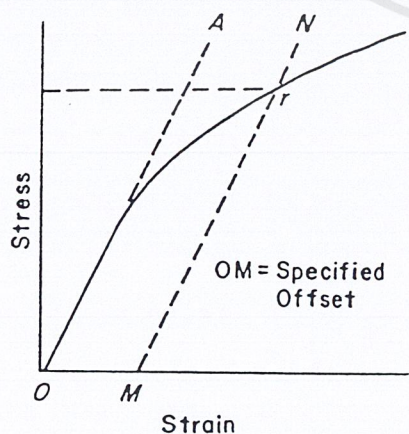


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

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.

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*.)

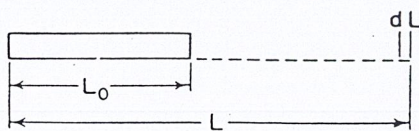


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

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:

$$\begin{aligned} \sigma &= W/A_o \\ \sigma_T &= W/A \\ \sigma_U &= W/A_o \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \Delta L/L_o = (L - L_o)/L_o \\ \epsilon_U &= (L_u - L_o)/L_o \\ \epsilon_T &= \int_{L_o}^L dL/L = \ln L/L_o \\ \%El &= [(L - L_o)/L_o] \times 100 = \epsilon \times 100 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

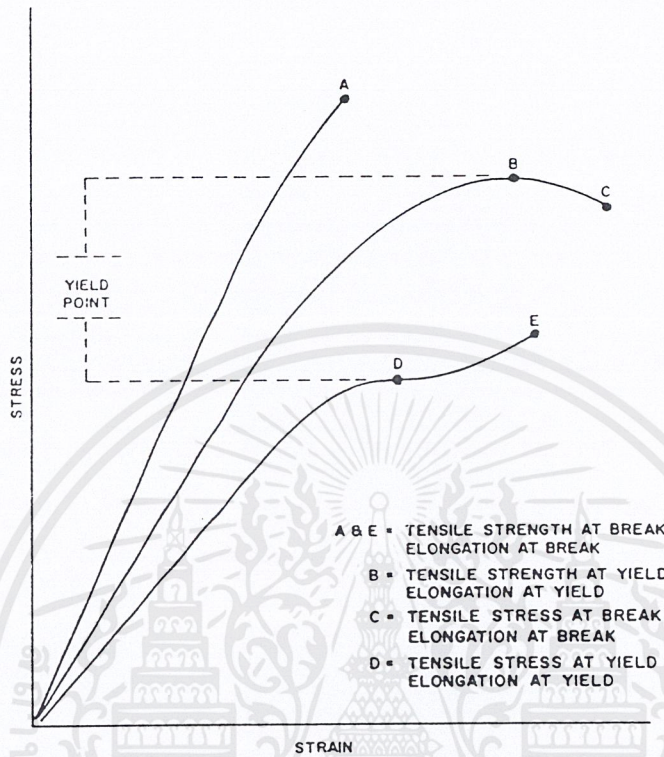


FIG. A2.3 Tensile Designations

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 Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 256; 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 reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

These test methods have been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace Methods 11221 (part) and 11231 (part) of Federal Test Method Standard No. 601, and to replace Method 107.1 of Federal Test Method Standard 406. These test methods are also approved for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of the resistance to breakage by flexural shock of plastics and electrical insulating materials, as indicated by the energy extracted from “standardized” (Note 1) pendulum-type hammers, mounted in “standardized” machines, in breaking standard specimens with one pendulum swing. The standard tests for these test methods require specimens made with a milled notch (Note 2). In the Charpy (Test Method B) and Izod (Test Methods A, C, and D) tests, the notch produces a stress concentration which promotes a brittle, rather than a ductile, fracture. In Test Method E, the unnotched impact strength is obtained by reversing the position in the vise of a notched specimen (Note 20). The results of all tests are reported in terms of energy absorbed per unit of specimen width.

NOTE 1—The machines with their pendulum-type hammers have been “standardized” in that they must comply with certain requirements, including a fixed height of hammer fall which results in a substantially fixed velocity of the hammer at the moment of impact. However, besides the fact that the designs of machines for use with Test Methods A and B (see Section 3) must be somewhat different, hammers of different initial energies (produced by varying their effective weights) are recommended for use with specimens of different impact strengths. Moreover, manufacturers of the equipment are permitted to use different lengths and constructions of pendulums (with resulting possible differences in pendulum rigidities (see Section 4), plus other differences in machine design. The specimens are “standardized” in that they are required to have either one of two fixed lengths (Test Methods A and B), one fixed depth and one particular design of milled notch. The width of the specimens is permitted to vary between limits.

NOTE 2—The notch in the Izod specimen serves to concentrate the stress, minimize plastic deformation, and direct the fracture to the part of the specimen behind the notch. Scatter in energy-to-break is thus reduced. However, because of differences in the elastic and visco-elastic properties of plastics, response to a given notch varies among materials. A measure of a plastic’s “notch sensitivity” may be obtained with Test Method D by comparing the energies to break specimens with identical notches, except for the radius at the base of the notch.

NOTE 3—Caution must be exercised in interpreting the results of these standard test methods. The following testing parameters may affect test results significantly:

- method of fabrication, including but not limited to processing technology, molding conditions, mold design, and thermal treatments;
- method of notching;

- speed of notching tool;
- design of notching apparatus;
- quality of the notch;
- time between notching and test;
- test specimen thickness, and
- environmental conditioning

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

1.3 *This standard does not purport to address the safety problems 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 647 Practice for Design of Molds for Test Specimens of Plastic Molding Materials²
- D 4066 Specification for Nylon Injection and Extrusion Materials³
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁴

3. Types of Tests

3.1 Two basically different test methods, A and B, are described. These differ as to design of machine and specimen and method of holding and striking the latter. A third test method, Test Method C, is Test Method A modified by the addition of the determination of toss correction. Test Method D provides a measure of notch sensitivity of plastics, while Test Method E gives an indication of the unnotched strength of a material. Each test method has characteristics that may dictate its use. There is no known means for correlating the results of tests made by the different test methods.

3.2 In Test Method A (Izod type) the specimen is held as a vertical cantilever beam and is broken by a single swing of the pendulum with the line of initial contact at a fixed distance from the specimen clamp and from the centerline of the notch and on the same face as the notch.

3.3 In Test Method B (Charpy type) the specimen is

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Dec. 28, 1990. Published February 1991. Originally published as D 256 – 26 T. Last previous edition D 256 – 90a.

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

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 14.02.

supported as a horizontal simple beam and is broken by a single swing of the pendulum with the impact line midway between the supports and directly opposite the notch.

3.4 Test Method C is the same as Test Method A but includes a determination of the energy expended in tossing a portion of the specimen. The value reported is called the "estimated net Izod impact strength." Test Method C is preferred over Test Method A for materials that have an Izod impact strength of less than 27 J/m of notch (0.5 ft·lbf/in. of notch). The differences between Test Methods A and C become unimportant for materials that have an Izod impact strength higher than this value.

3.5 Test Method D provides a measure of the notch sensitivity of a material. The stress-concentration at the notch increases with decreasing radius. For a given system, greater stress concentration results in higher local rates-of-strain. Since the effect of strain-rate on energy-to-break varies among materials, a measure of this effect may be obtained by testing specimens with different notch radii. In the Izod-type test it has been demonstrated⁵ that the function, energy-to-break versus notch radius, is reasonably linear from a radius of 0.03 to 2.5 mm (0.001 to 0.100 in.), provided that all specimens have the same type of break (4.7 and 25.2). For the purpose of this test, the slope, b , (26.1) of the line between radii of 0.25 and 1.0 mm (0.010 and 0.040 in.) is used unless tests with the 1.0-mm radius give "non-break" results. In that case, 0.25 and 0.50 mm (0.010 and 0.020 in.) radii may be used. The effect of notch radius on the impact energy to break a specimen under the conditions of this test is measured by the value b . Materials with low values of b , whether high or low energy to break with the standard notch, are relatively insensitive to differences in notch radius; while the energy to break materials with high values of b is highly dependent on notch radius. The parameter b cannot be used in design calculations but may serve as a guide to the designer and in selection of materials.

3.6 Test Method E is the reversed notch test and is used to give an indication of the unnotched impact strength of plastics.⁶ It is similar to Test Method A, except that the specimen is reversed in the vise of the machine 180° to the usual striking position, such that the striker of the apparatus impacts the specimen on the face opposite the notch (Fig. 1).

4. Significance and Use

4.1 The excess energy pendulum impact test indicates the energy to break standard test specimens of specified size under stipulated conditions of specimen mounting, notching (stress concentration), and pendulum velocity at impact.

4.2 The energy lost by the pendulum during the breakage of the specimen is the sum of the energies required (1) to initiate fracture of the specimen, (2) to propagate the fracture across the specimen, (3) to throw the free end (or ends) of the broken specimen ("toss correction"), (4) to bend the specimen, (5) to produce vibration in the pendulum arm, (6) to produce vibration or horizontal movement of the machine frame or base, (7) to overcome friction in the pendulum

bearing and in the excess energy indicating mechanism, and to overcome windage (pendulum air drag), (8) to indent or deform plastically the specimen at the line of impact, and (9) to overcome the friction caused by the rubbing of the striking nose (or other part of the pendulum) over the face of the bent specimen.

4.3 For relatively brittle materials for which fracture propagation energy is small in comparison with the fracture initiation energy, the indicated impact energy absorbed is, for all practical purposes, the sum of items (1) and (3) of 4.2. The toss correction (3) may represent a very large fraction of the total energy absorbed when testing relatively dense and brittle materials. Test Method C shall be used for materials that have an Izod impact strength of less than 27 J/m of notch (0.5 ft·lbf/in. of notch). The toss correction obtained in Test Method C is only an approximation of the toss error, since the rotational and rectilinear velocities may not be the same during the retoss of the specimen as for the original toss, and because stored stresses in the specimen may have been released as kinetic energy during the specimen fracture.

4.4 For tough, ductile, fiber filled, or cloth laminated materials, the fracture propagation energy (2) may be large compared to the fracture initiation energy (1). When testing these materials, factors (2), (5), and (9) can become quite significant, even when the specimen is accurately machined and positioned and the machine is in good condition with adequate capacity (Note 3). Bending (4) and indentation losses (8) may be appreciable when testing soft materials.

NOTE 3—Although the frame and base of the machine should be sufficiently rigid and massive to handle the energies of tough specimens without motion or excessive vibration, the pendulum arm can not be made very massive because the greater part of its mass must be concentrated near its center of percussion at the striking nose. Locating the striking nose precisely at the center of percussion reduces vibration of the pendulum arm when used with brittle specimens. However, some losses due to pendulum arm vibration, the amount varying with the design of the pendulum, will occur with tough specimens even when the striking nose is properly positioned.

4.5 In a well-designed machine of sufficient rigidity and mass the losses due to (6) and (7) should be very small. Vibrational losses (6) can be quite large when wide specimens of tough materials are tested in machines of insufficient mass, not securely fastened to a heavy base.

4.6 With some materials, a critical width of specimen may be found below which specimens will appear ductile, as evidenced by considerable drawing or necking down in the region behind the notch and by a relatively high energy absorption, and above which they will appear brittle as evidenced by little or no drawing down or necking and by a relatively low energy absorption. Since these test methods permit a variation in the width of the specimens and since the width dictates for many materials whether a brittle, low energy break or ductile, high energy, break will occur, it is necessary that the width be stated in the ASTM specification covering that material and that the width be stated along with the impact value.

4.7 The standard Test Methods A, C, D, and E require that the type of failure for each specimen be recorded as one of the four coded categories defined as follows:

- C *complete break*—a break in which the specimen separates into two or more pieces.
- H *hinge break*—an incomplete break such that one part of

⁵ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1021.

⁶ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1026.

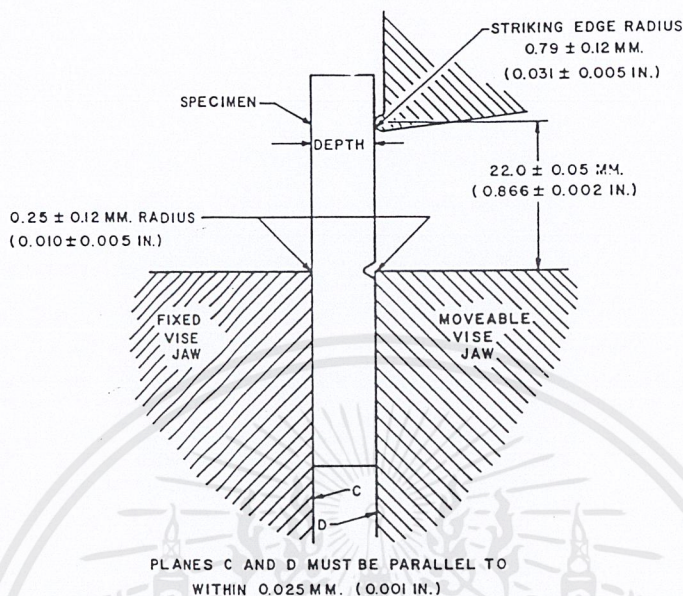


FIG. 1A Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Izod Test Methods A and C

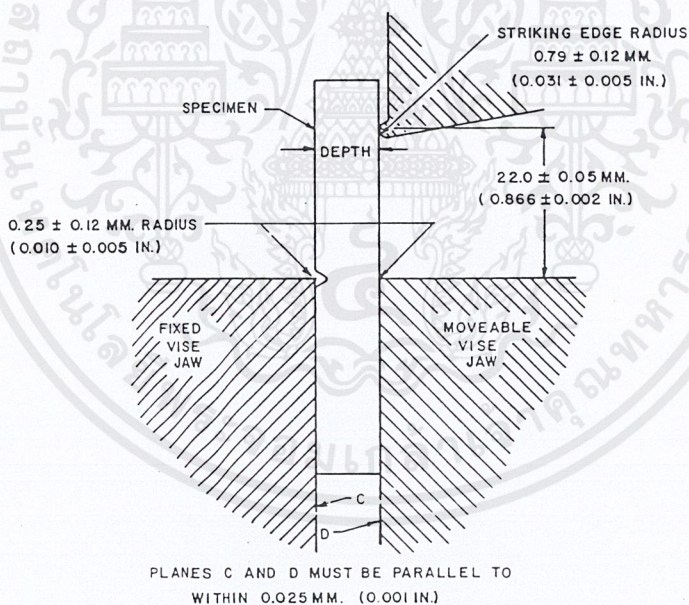


FIG. 1B Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Test Method E

the specimen cannot support itself above the horizontal when the other part is held vertically (less than 90° included angle).

P *partial break*—an incomplete break that does not meet the definition for a hinge break but has fractured at least 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.

NB *non-break*—an incomplete break where the fracture extends less than 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.

NOTE 4—In both the Izod (except Test Method E) and Charpy tests the fibers on the side of the specimen opposite the notch are stressed in compression during the fracture and can only be subjected to tension at the termination of the break when the momentum of one specimen half relative to the other tends to break the remaining fibers.

Test Method B requires that the specimen break completely. For tough materials the pendulum may not have the energy necessary to complete the breaking of the extreme fibers and toss the broken piece or pieces. Results obtained from unbroken specimens or other types of partially broken specimens shall be considered a departure from standard and

shall not be reported as a standard result. Results obtained from “non-break” specimens in Test Methods A, C, and E and for other than “complete breaks” in Test Method B shall be considered a departure from standard and shall not be reported as a standard result. Impact values cannot be directly compared for any two materials that experience different types of failure as defined in the method by this code. Averages reported must likewise be derived from specimens contained within a single failure category. This letter code will suffix the reported impact identifying the types of failure associated with the reported value. If more than one type of failure is observed for a sample material, then the report will indicate the average impact value for each type of failure, followed by the percent of the specimens failing in that manner and suffixed by the letter code.

4.8 The value of these impact test methods lies mainly in the areas of quality control and materials specification. If two groups of specimens of supposedly the same material show significantly different energy absorptions, types of breaks, critical widths, or critical temperatures, it may be assumed that they were made of different materials or were exposed to different processing or conditioning environments. The fact that a material shows twice the energy absorption of another under these conditions of test does not indicate that this same relationship will exist under another set of test conditions. The order of toughness may even be reversed under different testing conditions.

TEST METHOD A—CANTILEVER BEAM (IZOD-TYPE) TEST

5. Apparatus

5.1 The machine shall consist of a massive base on which is mounted a vise for holding the specimen and to which is connected, through a rigid frame and anti-friction bearings, one of a number of pendulum-type hammers (or one basic

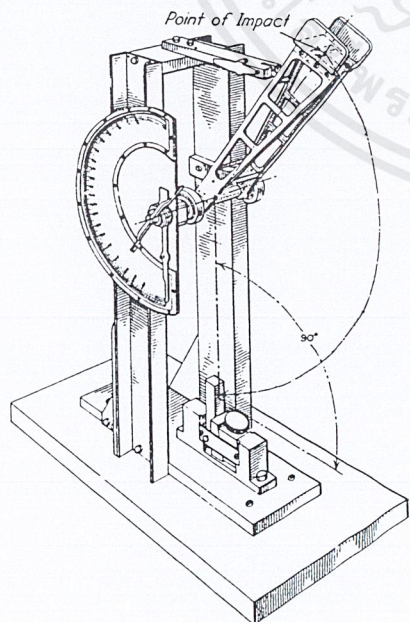


FIG. 2 Cantilever Beam (Izod-Type) Impact Machine



FIG. 3 A Jig for Positioning Specimen for Clamping

hammer to which extra weights may be attached) having an initial energy suitable for use with the particular specimen to be tested, plus a pendulum holding and releasing mechanism and a pointer and dial mechanism for indicating the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. A jig for positioning the specimen in the vise and graphs or tables to aid in the calculation of the correction for friction and windage also should be included. One type of machine is shown in Fig. 2. One design of specimen-positioning jig is illustrated in Fig. 3. Detailed requirements are given in subsequent paragraphs. General methods for checking and calibrating the machine are given in Appendix X1. Additional instructions for adjusting a particular machine should be supplied by the manufacturer.

5.2 The pendulum shall consist of a single or multimembered arm with a bearing on one end and a head, containing the striking nose, on the other. Although a large proportion of the mass of the pendulum should be concentrated in the head, the arm must be sufficiently rigid to maintain the proper clearances and geometric relationships between the machine parts and the specimen and to minimize vibrational energy losses which are always included in the measured impact value.

5.3 The striking nose of the pendulum shall be hardened steel and shall be a cylindrical surface having a radius of curvature of 0.79 ± 0.12 mm (0.031 ± 0.005 in.) with its axis horizontal and perpendicular to the plane of swing of the pendulum. The line of contact of the striking nose shall be located at the center of percussion of the pendulum within ± 2.54 mm (0.100 in.) (Note 5). Those portions of the pendulum adjacent to the cylindrical striking edge shall be recessed or inclined at a suitable angle so that there will be no chance for other than this cylindrical surface coming in contact with the specimen during the break.

NOTE 5—The distance from the axis of support to the center of percussion may be determined experimentally from the period of small amplitude oscillations of the pendulum by means of the following equation:

$$L = (g/4\pi^2) p^2$$

where:

L = distance from the axis of support to the center of percussion, m (or ft),

g = local gravitational acceleration (known to an accuracy of one part in one thousand), m/s^2 (or ft/s^2),

π = 3.1416 ($4\pi^2 = 39.48$), and

p = period, in seconds, of a single complete swing (to and fro) determined from at least 50 consecutive and uninterrupted swings (known to one part in two thousand). The angle of swing shall be less than 5° each side of center.

5.4 The position of the pendulum holding and releasing mechanism shall be such that the vertical height of fall of the striking nose shall be 610 ± 2 mm (24.0 ± 0.1 in.). This will produce a velocity of the striking nose at the moment of impact of approximately 3.46 m (11.35 ft)/s. The mechanism shall be so constructed and operated that it will release the pendulum without imparting acceleration or vibration to it.

NOTE 6—

$$V = \sqrt{2gh}$$

where:

V = velocity of the striking nose at the moment of impact,

g = local gravitational acceleration, and

h = vertical height of fall of the striking nose.

This assumes no windage or friction.

5.5 The effective length of the pendulum shall be between 0.325 and 0.406 m (12.8 and 16.0 in.) so that the above required elevation of the striking nose may be obtained by raising the pendulum to an angle between 60 and 30° above the horizontal.

5.6 The machine shall be provided with a basic pendulum capable of delivering an energy of 2.710 ± 0.135 J (2.00 ± 0.10 ft·lbf). This pendulum shall be used with all specimens that extract less than 85 % of this energy. Heavier pendulums shall be provided for specimens that require more energy to break. These may be separate interchangeable pendulums or one basic pendulum to which extra pairs of equal calibrated weights may be attached rigidly to opposite sides of the pendulum at its center of percussion. It is imperative that the extra weights shall not change the position of the center of percussion or the free-hanging rest point of the pendulum. A range of pendulums having energies from 2.710 to 21.680 J (2 to 16 ft·lbf) has been found to be sufficient for use with most plastic specimens and may be used with most machines. A series of pendulums such that each has twice the energy of the next lighter one will be found convenient. Each pendulum shall have an energy within ± 0.5 % of its nominal capacity.

5.7 A vise shall be provided for clamping the specimen rigidly in position so that the long axis of the specimen is vertical and at right angles to the top plane of the vise (Fig. 1). This top plane shall bisect the angle of the notch with a tolerance of 0.12 mm (0.005 in.). This correct positioning of the specimen is generally done with a jig furnished with the machine. The top edge at the fixed jaw of the vise shall have a radius of 0.25 ± 0.12 mm (0.010 ± 0.005 in.). For specimens whose thickness approaches the lower limiting value of 3.17 mm (0.125 in.), means shall be provided to prevent the lower half of the specimen from moving during the clamping or testing operations (Fig. 3).

NOTE 7—Some plastics are sensitive to clamping pressure; therefore, cooperating laboratories should agree upon some means of standard-

izing the clamping force, such as with a torque wrench on the specimen vise. If the faces of the vise or specimen are not parallel, a greater sensitivity to clamping pressure may be evident in the calibration procedure in Appendix X1 for adjustment and instructions for faulty instruments.

5.8 When the pendulum is free hanging, the striking surface shall come within 0.5 % of scale of touching the top face of a standard specimen. During an actual swing the element shall make initial contact with the specimen on a line 22.00 ± 0.05 mm (0.866 ± 0.002 in.) above the surface of the vise.

5.9 Means shall be provided for determining energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. Usually this will consist of a pointer and dial mechanism to indicate the height of rise of the pendulum beyond the point of impact in terms of energy removed from that specimen pendulum. Since the indicated remaining energy must be corrected for pendulum bearing friction, pointer friction, pointer inertia, and pendulum windage, instructions for making these corrections are included in 9.3 and Appendix X1.

5.10 The vise, pendulum, and frame shall be sufficiently rigid to assure correct alignment of the hammer and specimen, both at the moment of impact and during the propagation of the fracture, and to minimize energy loss due to vibration. The base shall be sufficiently massive that the impact will not cause it to move. The machine shall be designed, constructed, and maintained that energy losses due to pendulum air drag (windage), friction in the pendulum bearings, and friction and inertia in the excess energy-indicating mechanism, are held to a minimum.

5.11 A check of the calibration of an impact machine is difficult to make under dynamic conditions. The test parameters are normally checked under static conditions. If the machine passes the static tests, then it is assumed to be accurate. The calibration procedure in Appendix X1 shall be used to establish the accuracy of the equipment. However, for some machine designs it might be necessary to change the recommended method of obtaining the required calibration measurements. Other methods of performing the required checks may be substituted provided that they can be shown to result in an equivalent accuracy. Appendix X1 also describes a dynamic test for checking certain features of the machine and specimen.

6. Test Specimens

6.1 The test specimens shall conform to the dimensions and geometry of Fig. 4, except as modified in accordance with 6.2, 6.3, 6.4, and 6.5. To ensure the correct contour and conditions of the specified notch, all specimens shall be notched as directed in Section 7.

6.2 Molded specimens shall have a width between 12.7 and 12.7 mm (0.125 and 0.500 in.) as specified in the material specification or as agreed as representative of the cross section in which the particular material may be used (Notes 8 and 9). All specimens having one dimension less than 12.7 mm (0.500 in.) shall have the notch cut on the shorter side (Note 10). Otherwise, all compression specimens shall be notched on the side parallel to the direction of application of molding pressure (Note 11). The notch surface and the opposite surface may not be parallel in molded specimens due to the draft of the mold, and, therefore,

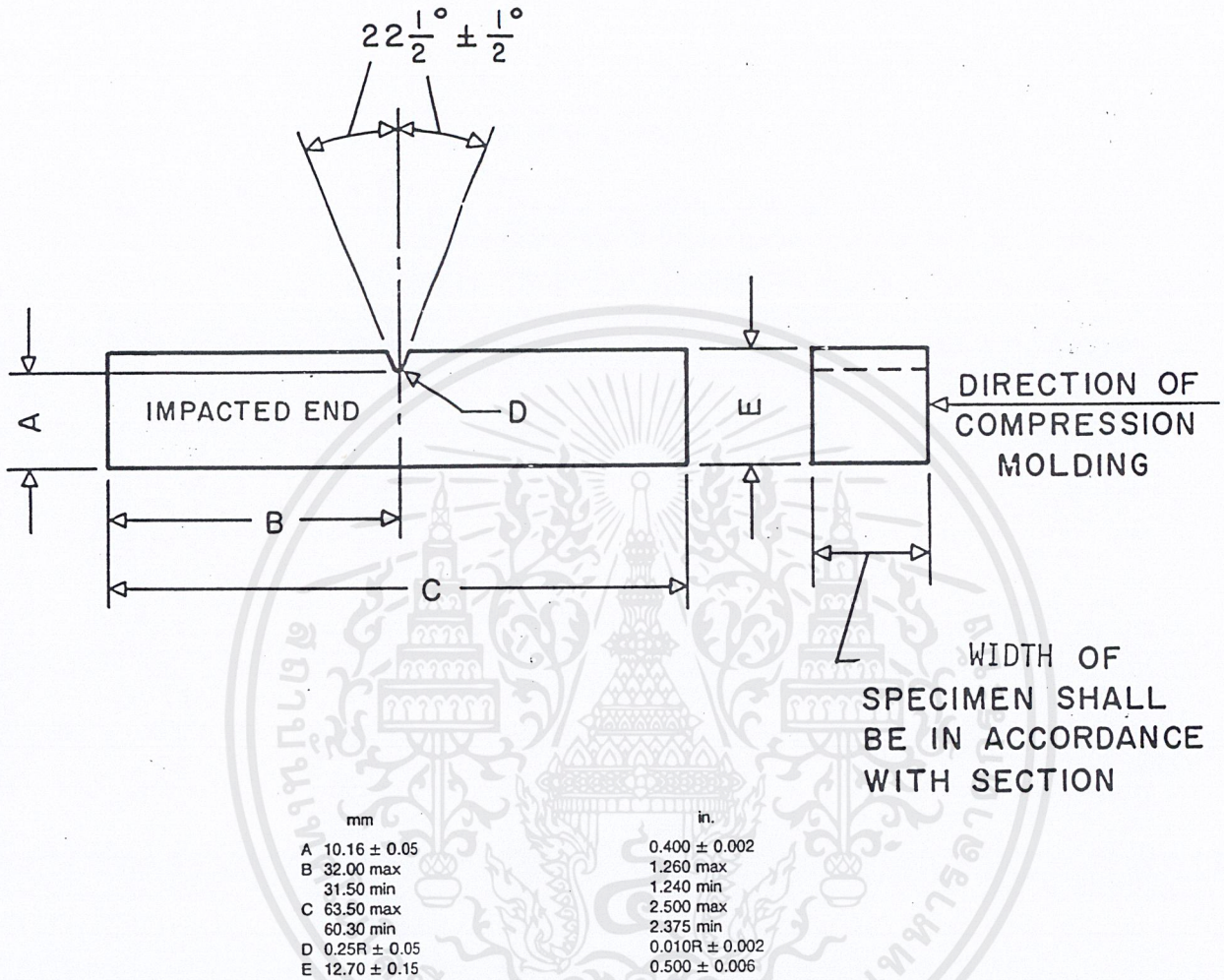


FIG. 4 Dimensions of Izod Type Test Specimen

it is essential that the notched surface be machined parallel to its opposite surface within 0.025 mm (0.001 in.), removing a minimum of material in the process, so as to remain within the allowable tolerance for the specimen depth (see Fig. 4).

NOTE 8—Extreme care must be used in handling specimens less than 6.35 mm (0.250 in.) wide. Such specimens must be accurately positioned and supported to prevent twist or lateral buckling during the test. Some materials, furthermore, are very sensitive to clamping pressure (see Note 7).

NOTE 9—The type of mold and molding machine used and the flow behavior in the mold cavity will influence the strength obtained. A specimen taken from one end of a molded bar may give different results from a specimen taken from the other end. Cooperating laboratories should, therefore agree on standard molds conforming to Practice D 647, and upon a standard molding procedure for the material under investigation.

NOTE 10—A critical investigation of the mechanics of impact testing has shown that tests made upon specimens under 6.36 mm (0.250 in.) wide absorb more energy due to crushing, bending, and twisting than do wider specimens. Therefore, specimens 6.36 mm (0.250 in.) or over in width are recommended. The responsibility for determining the minimum specimen width shall be the investigator's with due reference to the ASTM specification for that material.

NOTE 11—The impact strength of a plastic material may be different if the notch be perpendicular to rather than parallel to the direction of molding, as with or across the grain of an anisotropic bar cut from a plate.

6.3 For sheet materials, the specimens shall be cut from the sheet in both the lengthwise and crosswise directions unless otherwise specified. The width of the specimen shall be the thickness of the sheet if the sheet thickness is between 3.17 and 12.7 mm (0.125 and 0.500 in.). Sheet material thicker than 12.7 mm (0.500 in.) shall be machined down to 12.7 mm (0.500 in.). Specimens with a 12.7-mm (0.500 in.) square cross section may be tested either edgewise or flatwise as cut from the sheet. When specimens are tested flatwise, the notch shall be made on the machined surface if the specimen be machined on one face only. When the specimen is cut from a thick sheet, notation shall be made of the portion of the thickness of the sheet from which the specimen was cut, for example, center, top, or bottom surface.

6.4 The practice of cementing, bolting, clamping, or otherwise combining specimens of substandard width to form a composite test specimen is not recommended and

should be avoided since test results may be seriously affected by interface effects or effects of solvents and cements on energy absorption of composite test specimens, or both. However, if Izod test data on such thin materials are required when no other means of preparing specimens are available, and if possible sources of error are recognized and acceptable, the following technique of preparing composites may be utilized. The test specimen shall be a composite of individual thin specimens totaling 6.35 to 12.7 mm (0.250 to 0.500 in.) in width. Individual members of the composite shall be accurately aligned with each other and clamped, bolted or cemented (Note 12) together. The composite shall be machined to proper dimensions and then notched. In all such cases the use of composite specimens shall be noted in the report of test results.

NOTE 12—Care must be taken to select a solvent or adhesive that will not affect the impact resistance of the material under test. If solvents or solvent-containing adhesives are employed, a conditioning procedure shall be established to ensure complete removal of the solvent prior to test.

6.5 Each specimen shall be free of twist (Note 13) and shall be bounded by mutually perpendicular pairs of plane parallel surfaces, free from scratches, pits, and sink marks. The specimens shall be checked for conformity with these requirements by visual observation against straightedges, squares, and flat plates, and by measuring with micrometer calipers. Any specimen showing observable or measurable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the proper size and shape before testing.

NOTE 13—A specimen that has a slight twist to its notched face of 0.05 mm (0.002 in.) at the point of contact with the pendulum striking edge will be likely to have a characteristic fracture surface with considerable greater fracture area than for a normal break. In this case the energy to break and toss the broken section may be considerably larger (20 to 30 %) than for a normal break. A tapered specimen may require more energy to bend it in the vise before fracture.

7. Notching Test Specimens

7.1 Notching shall be done on a milling machine, engine lathe, or other suitable machine tool, accurate to 0.025 mm (0.001 in.). Both the feed speed and the cutter speed shall be constant throughout the notching operation (Note 16). Provision for cooling the specimen with either a liquid or gas coolant is recommended. A single-tooth cutter shall be used for notching the specimen, unless notches of an equivalent quality can be produced with a multitooth cutter. Single-tooth cutters are preferred because of the ease of grinding the cutter to the specimen contour and because of the smoother cut on the specimen. The cutting edge shall be carefully ground and honed to ensure sharpness and freedom from nicks and burrs. Tools with no rake and a work relief angle of 15 to 20° have been found satisfactory.

7.2 Specimens may be notched separately or in a group. However, in either case an unnotched back-up or “dummy” bar shall be placed behind the last specimen in the sample holder to prevent distortion and chipping by the cutter as it exits from the last test specimen.

7.3 The profile of the cutting tooth or teeth shall be such as to produce a notch of the contour and depth in the test specimen as specified in Fig. 4 (Note 14). The included angle of the notch shall be $45 \pm 1^\circ$ with a radius of curvature at the apex of 0.25 ± 0.05 mm (0.010 ± 0.002 in.). The plane

bisecting the notch angle shall be perpendicular to the face of the test specimen within 2°.

NOTE 14—There is evidence that notches cut in materials of widely differing physical properties by the same cutter may differ in contour. If the notch in the specimen should take the contour of the cutter, then the contour of the tip of the cutter may be checked instead of the notch in the specimen for single-tooth cutters. Under the same condition, multi-tooth cutters may be checked by measuring the contour of a strip of soft metal shim inserted between two bars for notching.

7.4 The depth of the plastic material remaining in the bar under the notch shall be 10.16 ± 0.05 mm (0.400 ± 0.002 in.). This dimension shall be measured, on a random selection of at least 20 % of each group of specimens notched at the same time, with a special micrometer⁷ having a contour anvil of $42 \pm 2^\circ$ with a radius of curvature at the apex of 0.13 ± 0.07 mm (0.005 ± 0.003 in.). In the case of referee testing, each specimen shall be measured.

7.5 Cutter speed and feed speed should be chosen appropriate for the material being tested since the quality of the notch may be adversely affected by thermal deformations and stresses induced during the cutting operation if proper conditions are not selected.⁸ The notching parameters used shall not alter the physical state of the material such as by raising the temperature of a thermoplastic above its glass transition temperature. In general, high cutter speeds, slow feed rates, and lack of coolant induce more thermal damage than a slow cutter speed, fast feed speed, and the use of a coolant. Too high a feed speed/cutter speed ratio, however, may cause impacting and cracking of the specimen. The range of cutter speed/feed ratios possible to produce acceptable notches can be extended by the use of a suitable coolant (Note 15). In the case of new types of plastics and electrical insulating materials, it is necessary to study the effect of variations in the notching conditions (Note 17).

NOTE 15—Water or compressed gas is a suitable coolant for many plastics.

NOTE 16—To establish that the notching parameters are suitable, the quality of the notch can be checked with a metallograph or suitable microscope using at least a 60× magnification. The notch should be checked on both the tool entrance and tool exit side of the specimen. Embedded thermocouples can be used to determine the temperature rise in the material near the apex of the notch during machining. Thermal stresses induced during the notching operation can be observed in transparent materials by viewing the specimen at low magnification between crossed polars in monochromatic light.

NOTE 17—For some thermoplastics, cutter speeds from 53.3 to 150 m/min (160 to 450 ft/min) at a feed speed of 88.9 to 160 mm/min (3.5 to 6.3 in./min) without a water coolant or the same cutter speeds at feed of from 35.6 to 160 mm/min (1.4 to 6.3 in./min) with water coolant produced suitable notches.

7.6 After an individual cutter has been used to produce 300 notches, or more often as circumstances may indicate, the notch in a specimen (Note 18) shall be inspected for a clean, sharp cut, freedom from nicks, thermal deformation, correct radius of tip, and notch angle. If the angle or radius should not fall within the specified limits for materials of satisfactory machining characteristics, then the cutter shall be replaced with a newly sharpened and honed one.

⁷ Available from Custom Scientific Instruments, Inc., P.O. Box A, Whippany, NJ 07981, and Testing Machines, Inc., 400 Bayview Ave., Amityville, NY 11701.

⁸ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1066.

NOTE 18—PMMA (3.17 mm (1/8 in.)) has been found useful for checking the sharpness of a cutter. Dull cutters tend to form cracks at the apex of the notch. A microscope with a camera lucida attachment (60× magnification) is suitable for checking the radius and angle of notch.

NOTE 19—A carbide-tipped notching cutter is recommended for longer service life.

8. Conditioning

8.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h after notching and prior to testing in accordance with Procedure A of Methods D 618, unless it can be documented (between supplier and customer) that shorter conditioning time is sufficient for a given material to reach equilibrium of impact strength.

8.1.1 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 % RH and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

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

9. Procedure

9.1 At least five and preferably ten or more individual determinations of impact value must be made on each sample to be tested under the conditions prescribed in Section 8. Each group shall consist of specimens of one nominal width only. In the case of specimens cut from sheets that are suspected of being anisotropic, prepare and test specimens from each principal direction (lengthwise and crosswise to the direction of anisotropy).

9.2 Estimate the breaking energy for the specimen and select a pendulum of suitable energy. Use the lightest standard pendulum that is expected to break each specimen in the group with a loss of not more than 85 % of its energy (Note 20). Check the machine with the proper pendulum in place for conformity with the requirements of Section 5 before starting the tests (see Appendix X1).

NOTE 20—Ideally an impact test would be conducted at a constant test velocity. In a pendulum-type test the velocity decreases as the fracture progresses. For specimens that have an impact energy approaching the capacity of the pendulum there is insufficient energy to complete the break and toss. By avoiding the higher 15 % scale energy readings the velocity of the pendulum will not be reduced below 1.33 m/s (4.4 ft/s). On the other hand, the use of too heavy a pendulum would reduce the sensitivity of the reading.

9.3 Before testing the specimens, perform the following operations on the machine:

9.3.1 With the excess energy indicating pointer in its normal starting position but without a specimen in the vise, release the pendulum from its normal starting position and note the position the pointer attains after the swing as one reading of factor *A*.

9.3.2 Without resetting the pointer, raise the pendulum and release again. The pointer should move up the scale an

additional amount. Repeat (2) until a swing causes no additional movement of the pointer and note the final reading as one reading of factor *B*.

9.3.3 Repeat the above two operations several times and calculate and record the average *A* and *B* readings.

NOTE 21—Factor *B* is an indication of the energy lost by the pendulum to friction in the pendulum bearings and to windage. The difference *A*–*B* is an indication of the energy lost to friction and inertia in the excess energy indicating mechanism. However, the actual corrections will be smaller than these factors, since in an actual test the energy absorbed by the specimen prevents the pendulum from making a full swing. Therefore, the indicated breaking strength of the specimen must be included in the calculation of the machine correction before using it in 9.6. These *A* and *B* values also provide an indication of the condition of the machine. If they indicate excessive friction, the machine shall be adjusted before starting a test.

9.4 Check the specimens for conformity with the requirements of Sections 6 and 7. Measure the width of each specimen in the region of the notch with a micrometer caliper to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) and record its average width along with its identifying markings.

9.5 Position the specimen precisely (5.7) and rigidly but not too tightly (Note 7) clamped in the vise. Pay special attention to assure that the “impacted end” of the specimen as shown and dimensioned in Fig. 4 be the end projecting above the vise. Release the pendulum and note and record the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen, together with a description of the appearance of the broken specimen (see failure categories in 4.7).

9.6 Calculate the machine correction from the indicating breaking strength of the specimen and factors *A* and *B* using tables or the graph described in Appendix X2. Subtract the correction so calculated from the indicated breaking strength of the specimen. Compare the net value so found with the energy requirement of the hammer specified in 9.2. If a hammer of improper energy was used, discard the result and make additional tests on new specimens with the proper hammer. If the proper hammer was used, divide the net value so found by the measured width of the particular specimen to obtain its impact strength in joules per metre (foot-pounds-force per inch) of width.

9.7 Calculate the average impact strength of the group of specimens. However, only values of specimens having the same nominal width and type of break may be averaged. Values obtained from specimens that did not break in the manner specified in 4.7 shall not be included in the average. When required, also calculate the standard deviation of the group of values.

10. Report

10.1 The report shall include the following:

10.1.1 Complete identification of the material tested, including type source, manufacturer's code number, and previous history.

10.1.2 A statement of how the specimens were prepared, the testing conditions used, the number of hours the specimens were conditioned after notching, and, for sheet materials, the direction of testing with respect to anisotropy, if any.

10.1.3 The capacity of the pendulum in joules, or foot-pounds-force, or inch-pounds-force.

10.1.4 The nominal width of the specimen.

NOTE 22—All abbreviated or tabulated reports shall include after the Izod impact strength value the nominal specimen width in millimetres or inches in brackets (see 4.6).

10.1.5 The total number of specimens tested per sample of material (that is, five, ten, or more).

10.1.6 The number of those specimens that resulted in failures conforming to each of the categories requirements of 4.7.

10.1.7 The average impact strength in joules per metre, or foot-pounds-force per inch, of width of the specimens of 10.1.6 for each failure category except non-break.

10.1.8 If required, the standard deviation of the values of the impact strengths of the specimens of 10.1.6.

10.1.9 The percent of specimens failing in each category suffixed by the corresponding letter code from 4.7.

TEST METHOD B—SIMPLE BEAM (CHARPY-TYPE) TEST

11. Apparatus

11.1 The machine shall consist of a massive base on which are mounted a pair of supports for holding the specimen and to which is connected, through a rigid frame and anti-friction bearings, one of a number of pendulum-type hammers having an initial energy suitable for use with the particular specimen to be tested, plus a pendulum holding and releasing mechanism and a pointer and dial mechanism for indicating the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. A jig for positioning the specimen on the supports and graphs or tables to aid in the calculation of the correction for friction and windage also should be included. One design of machine is illustrated in Fig. 5. Specific requirements are given in subsequent paragraphs. General methods for checking and calibrating the machine are given in Appendix X1. Additional instructions for adjusting a particular machine should be supplied by the manufacturer.

11.2 Same as 5.2.

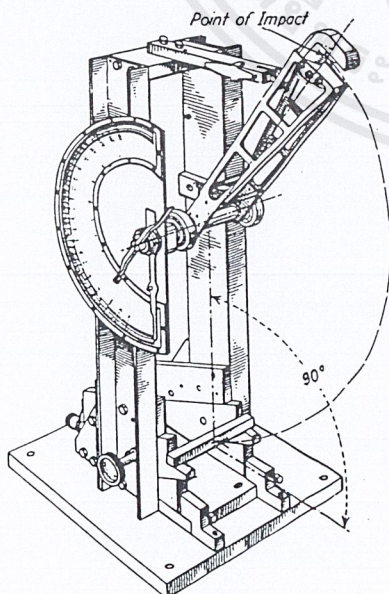


FIG. 5 Simple Beam (Charpy-Type) Impact Machine

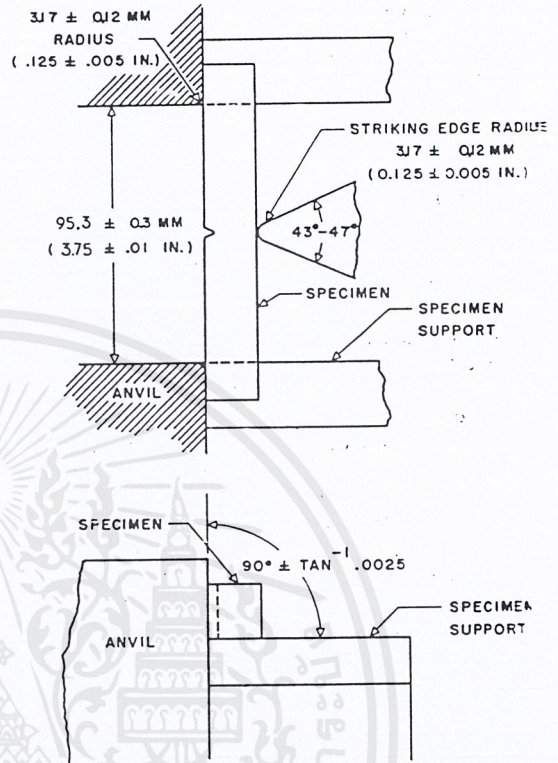


FIG. 6 Relationship of Anvil, Specimen and Striking Edge to Each Other for Charpy Test Method

11.3 The striking edge of the pendulum shall be made of hardened steel, tapered to have an included angle of 45 ± 2 and shall be rounded to a radius of 3.17 ± 0.12 mm (0.125 ± 0.005 in.). It shall be so aligned that when the pendulum is free hanging the cylindrical impacting surface shall have a vertical axis and be tangent to the front face of a rectangular standard specimen to within 0.025 mm (0.001 in.). In the free hanging position the center of percussion of the pendulum shall lie within 2.54 mm (0.100 in.) of the midline of the line of contact made by the striking nose upon the face of a standard specimen of square cross section (Note 5).

11.4 Same as 5.4.

11.5 Same as 5.5.

11.6 The machine shall be provided with a basic pendulum capable of delivering an energy of 2.710 ± 0.135 J (2.00 ± 0.10 ft·lb). This pendulum shall be used with specimens that extract less than 85 % of this energy. Heavy pendulums shall be provided for specimens that require more energy to break. Each pendulum shall have an error within 0.5 % of its nominal capacity.

11.7 The test specimen shall be supported against rigid anvils in such a position that its center of gravity and the center of the notch shall lie on tangent to the arc of travel of the center of percussion of the pendulum drawn in the position of impact. The edges of the anvils shall be rounded to a radius of 3.17 ± 0.12 mm (0.125 ± 0.005 in.) and the anvils' lines of contact with the specimen shall be 101.6 ± 0.25 mm (4.000 ± 0.020 in.) apart (Fig. 6).

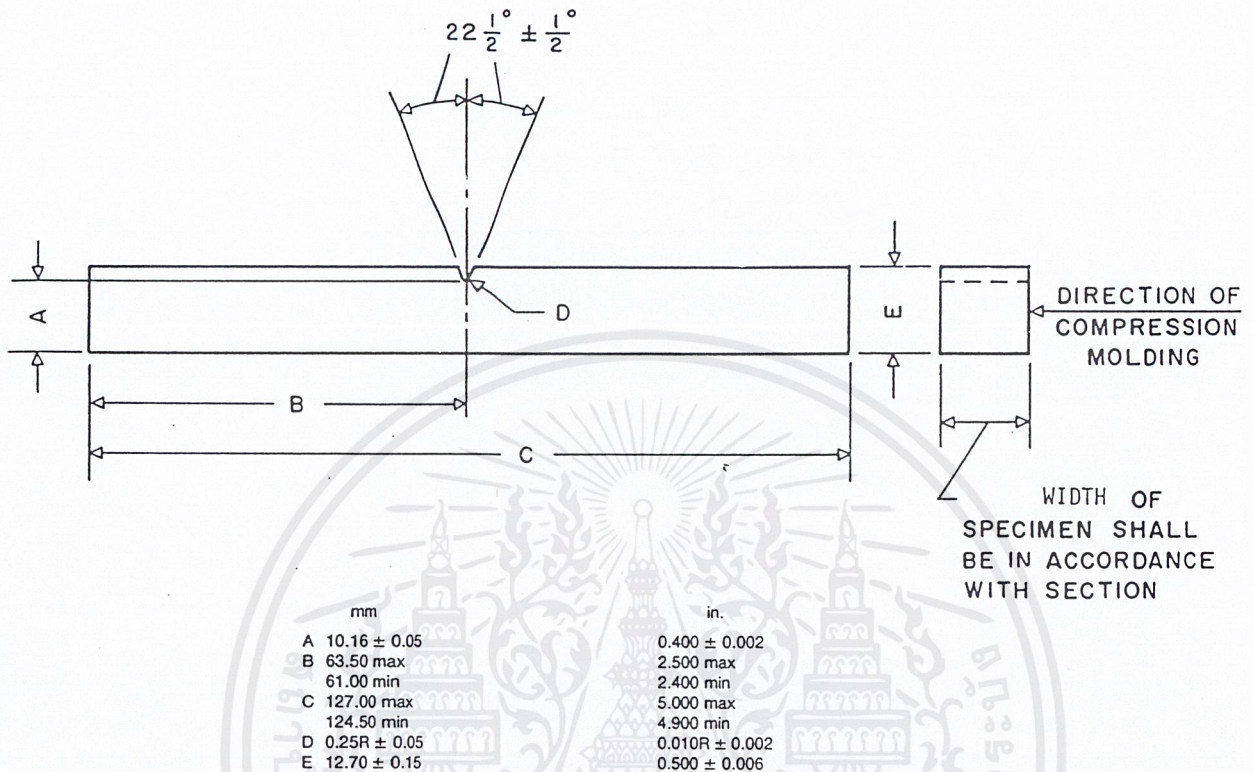


FIG. 7 Dimensions of Simple Beam, Charpy Type, Impact Test Specimen

11.8 Same as 5.9.

NOTE 23—Some machines currently in use employ a 108.0-mm (4.25-in.) span. Data obtained under these conditions are valid.⁹

11.9 Same as 5.10.

11.10 Same as 5.11.

12. Test Specimen

12.1 The test specimen shall conform to the dimensions and geometry of Fig. 7, except as modified in accordance with 12.2, 12.3, 12.4, and 12.5. To ensure the correct contour and conditions of the specified notch, all specimens shall be notched as directed in Section 7.

12.2 Same as 6.2.

12.3 Same as 6.3.

12.4 Same as 6.4.

12.5 Same as 6.5.

13. Conditioning

13.1 *Conditioning*—See 8.1.

13.2 *Test Conditions*—See 8.2.

14. Procedure

14.1 Same as 9.1.

14.2 Same as 9.2.

14.3 Same as 9.3.

14.4 Check the specimen for conformity with the requirements of Section 12. Measure the width of each specimen in the region of the notch with a micrometre caliper to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) and record its average width along with its identifying markings.

14.5 Position the test specimen precisely on the supports in a horizontal position so that it will be impacted edgewise at its center on the face opposite the notch for notched specimens. Release the pendulum and note and record the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen, together with a description of the appearance of a broken specimen.

14.6 Same as 9.6.

14.7 Same as 9.7.

15. Report

15.1 The report shall include the following:

15.1.1 Same as 10.1.1.

15.1.2 Same as 10.1.2.

15.1.3 Same as 10.1.3.

15.1.4 The nominal width of the specimens.

15.1.5 Same as 10.1.5.

15.1.6 The number of those specimens that resulted in a complete break.

15.1.7 The average impact strength in joules per metre, or foot-pounds-force per inch, of width for the specimens of 15.1.6 above that resulted in a complete break (Note 24). Impact strengths are not to be reported for other than complete breaks.

⁹ Supporting round-robin data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1033.

NOTE 24—All abbreviated or tabulated reports shall affix behind the Charpy impact strength value the nominal specimen thickness in millimetres (or inches) in brackets (see 4.6).

15.1.8 Same as 10.1.8.

15.1.9 The percent of specimens failing with a complete break.

15.1.10 Span (see Note 23).

TEST METHOD C—CANTILEVER BEAM (IZOD-TYPE) TEST FOR MATERIALS OF LESS THAN 27 J/m (0.5 ft·lbf/in.) OF NOTCH

16. Apparatus

16.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 5.

17. Test Specimen

17.1 The test specimen shall be the same as specified in Section 6.

18. Conditioning

18.1 *Conditioning*—See 8.1.

18.2 *Test Conditions*—See 8.2.

19. Procedure

19.1 The procedure shall be the same as in Section 9 with the addition of a procedure for estimating the energy to toss the broken specimen part. Make an estimate of the magnitude of the energy to toss each different type of material and each different specimen size (width). This is done by repositioning the free end of the broken specimen on the clamped portion and striking it a second time with the pendulum released in such a way as to impart to the specimen approximately the same velocity it had attained during the test. This is done by releasing the pendulum from a height corresponding to that to which it rose following the breakage of the test specimen. The energy to toss is then considered to be the difference between the reading described above and the free swing reading obtained from this height. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

20. Report

20.1 The report shall be the same as in Section 10 with the addition of the following:

20.1.1 The estimated toss correction expressed in joules per metre of notch or foot-pounds-force per inch of notch, obtained by dividing the energy to toss in joules or foot-pounds-force by the specimen width in metres or inches, and

20.1.2 The difference between the Izod impact strength and the toss correction reported as the estimated net Izod impact strength.

TEST METHOD D—NOTCH RADIUS SENSITIVITY TEST

21. Apparatus

21.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 5.

22. Test Specimen

22.1 The specimens shall be the same as specified in Section 6. All specimens must be of the same nominal width,

preferably 6.35 mm (0.25 in.).

23. Notching

23.1 Notching shall be done as specified in Section 7 and Fig. 4, except that 10 specimens shall be notched with a radius of 0.25 mm (0.010 in.) and 10 specimens with a radius of 1.0 mm (0.040 in.).

24. Conditioning

24.1 Condition specimens in accordance with Section 8.

25. Procedure

25.1 Proceed in accordance with Section 9, testing a minimum of 5 (preferably 10) specimens of each notch radius.

25.2 The average impact strength of each group shall be calculated, except that within each group the type of break must be homogeneously C, H, C & H, or P.

25.3 If the specimens with the 0.25-mm (0.010-in.) radius notch do not break, the test is not applicable.

25.4 If any of 10 specimens tested with the 1.0 mm (0.040 in.) notch fail as in category NB, nonbreak, the notch sensitivity procedure cannot be used without obtaining additional data. A new set of specimens should be prepared from the same sample, using a 0.50-mm (0.020-in.) notch radius and the procedure of 25.1 and 25.2 repeated.

26. Calculation

26.1 The slope of the line connecting the values for impact energy-to-break for 0.254 and 1.012-mm (0.010 and 0.040-in.) notch radius (or 0.508-mm (0.020-in.) notch radius if applicable) should be calculated as follows:

$$b = E_A - E_B/R_2 - R_1$$

where:

E_A, E_B = average energy to break for the larger and smaller notch radii respectively, J/m (ft·lbf/in.) of notch,

R_2 = radius of the larger notch, m (in.), and

R_1 = radius of the smaller notch, m (in.).

Example: $E_{40} = 6.2$ ft·lbf/in. $E_{10} = 2.6$ ft·lbf/in.

$b = 6.2 - 2.6/0.040 - 0.010 = 3.6/0.03 = 120$ ft·lbf/in. of notch/in. (radius)

27. Report

27.1 The average value of b with its units, and the average Izod impact energy, 0.254 mm (0.010 in.) notch, shall be reported.

TEST METHOD E—CANTILEVER BEAM REVERSED NOTCH TEST

28. Apparatus

28.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 5.

29. Test Specimen

29.1 The test specimen shall be the same as specified in Section 6.

30. Notching Test Specimens

30.1 Notch the test specimens in accordance with Section 7.

31. Conditioning

- 31.1 See 8.1.
- 31.2 Test Conditions—See 8.2.

32. Procedure

32.1 Proceed in accordance with Section 9, except clamp the specimen so that the striker impacts it on the face opposite the notch, hence subjecting the notch to compressive, rather than tensile stresses during impact (see Fig. 1b and Notes 25, 26, and 27).

NOTE 25—The reversed notch test employs a standard 0.25-mm (0.010-in.) notch specimen to provide an indication of unnotched impact strength. Use of the reversed notch test obviates the need for machining unnotched bars to the required 10.16 ± 0.05-mm (0.400 ± 0.002-in.) depth before testing and provides the same convenience of specimen mounting as the standard notch tests (Test Methods A and C).

NOTE 26—Where materials are suspected of anisotropy, due to molding or other fabricating influences, notch reverse-J notch specimens on the face opposite to that used for the standard Izod test; that is, present the same face to the impact blow.

NOTE 27—Results obtained by the reversed notch test may not always agree with those obtained on unnotched bars that have been machined to the 10.16-mm (0.400-in.) depth requirement. For some materials, the effects arising from the difference in the clamped masses of the two specimen types during test, and those attributable to a possible difference in loss energies ascribed to the broken ends of the respective specimens, may contribute significantly to a disparity in test results.

33. Report

- 33.1 The report shall include the following:
 - 33.1.1 Same as 10.1.1,
 - 33.1.2 Same as 10.1.2,
 - 33.1.3 Same as 10.1.3,
 - 33.1.4 Same as 10.1.4,
 - 33.1.5 Same as 10.1.5,
 - 33.1.6 Same as 10.1.6,
 - 33.1.7 The average reversed notch impact strength, in joules per metre, or foot-pounds-force per inch, of width of

- the specimens of 10.1.6 for each category except non-break,
- 33.1.8 Same as 10.1.8, and
- 33.1.9 Same as 10.1.9.

34. Precision and Bias

34.1 Tables 1, 2, and 3 are based on a round robin¹⁰ in accordance with Practice E 691. For each material, all the test bars were prepared at one source, except for notching. Each participating laboratory notched the bars that they tested. Tables 1, 2, and 3 are presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin each laboratory tested, on average, nine specimens of each material.

34.2 Table 4 is based on a round robin⁶ involving five materials tested by seven laboratories. For each material, all the samples were prepared at one source, and the individual specimens were all notched at the same laboratory. Table 4 is presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin, each laboratory tested ten specimens of each material.

NOTE 28—Caution: The following explanations of I_r and I_R (34.3 through 34.3.3) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 1 through 4 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 34.3 through 34.3.3 would then be valid for such data.

34.3 Concept of I_r and I_R —If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing 5 specimens.

¹⁰ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D-20-1134.

TABLE 1 Precision, Test Method A (Izod)

| Material | Values in ft·lbf/in. of width | | | | | No. of Laboratories |
|------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| | Avg | S_r^A | S_R^B | I_r^C | I_R^D | |
| Phenolic | 0.57 | 0.024 | 0.076 | 0.06 | 0.21 | 19 |
| Acetal | 1.45 | 0.075 | 0.604 | 0.21 | 1.70 | 9 |
| Reinforced nylon | 1.98 | 0.083 | 0.245 | 0.23 | 0.69 | 15 |
| Polypropylene | 2.66 | 0.154 | 0.573 | 0.43 | 1.62 | 24 |
| ABS | 10.8 | 0.136 | 0.595 | 0.38 | 1.65 | 25 |
| Polycarbonate | 16.4 | 0.295 | 1.056 | 0.63 | 2.98 | 25 |

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average,
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average,
^C I_r = 2.83 S_r , and
^D I_R = 2.83 S_R .

TABLE 2 Precision, Test Method B (Charpy)

| Material | Values in ft·lbf/in. of width | | | | | No. of Laboratories |
|------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| | Avg | S_r^A | S_R^B | I_r^C | I_R^D | |
| Phenolic | 0.55 | 0.029 | 0.050 | 0.08 | 0.14 | 7 |
| Reinforced nylon | 1.98 | 0.065 | 0.143 | 0.18 | 0.40 | 7 |
| Polycarbonate | 2.85 | 0.083 | 0.422 | 0.23 | 1.19 | 8 |
| Polypropylene | 4.06 | 0.151 | 0.422 | 0.42 | 1.19 | 9 |
| ABS | 10.3 | 0.115 | 0.629 | 0.32 | 1.78 | 9 |

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average,
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average,
^C I_r = 2.83 S_r , and
^D I_R = 2.83 S_R .

TABLE 3 Precision, Test Method C (Izod with Toss Correction)

| Material | Values in ft·lbf/in. of width | | | | | No. of Laboratories |
|----------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| | Avg | S_r^A | S_R^B | I_r^C | I_R^D | |
| Phenolic | 0.45 | 0.038 | 0.129 | 0.10 | 0.36 | 15 |

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average,
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average,
^C I_r = 2.83 S_r , and
^D I_R = 2.83 S_R .

TABLE 4 Precision, Test Method E (Reversed Notch Izod)

| Material | Values in ft·lbf/in. of width | | | | |
|---|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Avg | S_r^A | S_R^B | I_r^C | I_R^D |
| Acrylic sheet, unmodified | 3.02 | 0.243 | 0.252 | 0.68 | 0.71 |
| Premix molding compounds laminate | 6.11 | 0.767 | 0.786 | 2.17 | 2.22 |
| Rubber modified acrylic, injection molded | 10.33 | 0.878 | 1.276 | 2.49 | 3.61 |
| Sheet molding compound (SMC) laminate | 11.00 | 0.719 | 0.785 | 2.03 | 2.22 |
| Preformed mat laminate | 19.43 | 0.960 | 1.618 | 2.72 | 4.58 |

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average,
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average,
^C I_r = 2.83 S_r , and
^D I_R = 2.83 S_R .

34.3.1 *Repeatability*, I_r , (Comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day)—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material.

34.3.2 *Reproducibility*, I_R , (Comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days)—The two test results

should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material.

34.3.3 Any judgment in accordance with 34.3.1 and 34.3.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

34.4 *Bias*—There are no recognized standards by which to estimate bias of this test method.

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. CALIBRATION OF LOW-CAPACITY (1.36 TO 21.68-J OR 1 TO 16-FT•LBF) IMPACT MACHINES FOR USE WITH PLASTIC SPECIMENS

X1.1 This calibration procedure applies specifically to the Izod impact machine. However, much of this procedure can be applied to the Charpy impact machine as well.

X1.2 Locate the impact machine on a sturdy base. It shall not “walk” on the base and the base shall not vibrate appreciably. Loss of energy from vibrations will give high readings. It is recommended that the impact tester be bolted to a base weighing at least 23 kg (50 lb) if it is used at capacities higher than 2.71 J (2 ft·lbf).

X1.3 Check the levelness of the machine in both directions in the plane of the base with spirit levels mounted in the base, by a machinist’s level if a satisfactory reference surface is available, or with a plumb bob. The machine should be level to within $\tan^{-1} 0.001$ in the plane of swing and to within $\tan^{-2} 0.002$ in the plane perpendicular to the swing.

X1.4 With a straightedge check the height of the specimen clamping block relative to the vise. It must match the height of the vise within 0.08 mm (0.003 in.).

X1.5 Check the transverse location of the center of the pendulum striking edge which shall be within 0.40 mm (0.016 in.) of the center of the vise. Readjust the shaft bearings or relocate the vise, or straighten the pendulum

shaft as necessary to attain the proper relationship between the two centers.

X1.6 Check the pendulum arm for straightness within 1.2 mm (0.05 in.) with a straightedge or by sighting down the shaft. This arm is sometimes bent by allowing the pendulum to slam against the catch when high capacity weights are on the pendulum.

X1.7 Insert vertically and center with a locating jig in the vise a straight machined bar 12.7 mm (0.500 in.) square and 25.4 mm (1 in.) long. Check the bar for vertical alignment within $\tan^{-1} 0.005$ in both directions with a small machinist’s level. Shim up the vise if necessary to correct for errors in the plane of pendulum swing, using care to preserve solid support for the vise. For errors in the plane perpendicular to the plane of pendulum swing, machine the inside face of the clamp type locating jig for correct alignment. If a blade-type jig is used, grind the shims or the base of the vise to bring the top surface level.

X1.8 Place a 60-mm (2.5-in.) length of unnotched metal bar ground flat and parallel within 0.025 mm (0.001 in.) in the center of the vise in the vertical position. Place a thin film of oil on the striking edge of the pendulum with an oiled tissue and let the striking edge rest gently against the specimen. The striking edge should make uniform contact

across the surface of the bar. If partial contact is made, examine the vise or pendulum for the cause of the misalignment. If no cause is apparent, remove the striking edges and shim up the low side or grind the striker back face for good contact of the striking edge with the specimen.

X1.9 Check oil line on face of bar for horizontal setting of striking edge within $\tan^{-1} 0.002$ with a machinist's square.

X1.10 Without taking the bar of X1.8 from the vise of the machine, scratch a thin line on the face opposite the striking face of the bar at the top edge of the vise. Remove the bar from the vise and transfer this line to the striking face, using a machinist's square. The distance from the striking oil line to the top edge of the vise should be 21.95 to 22.05 mm (0.864 to 0.868 in.). Correct with shims or grinding as necessary at the bottom of the vise.

X1.11 Insert the bar of X1.8 again in the vise and clamp it tightly in the vertical position. When the pendulum is hanging free in its lowest position, the striking edge should come within 0.5 % of scale on either side of the position of contact with the specimen.

X1.12 Swing the pendulum to a horizontal position and support it by the striking edge in this position with a 6.3 mm (1/4-in.) diameter vertical bar. Allow the other end of this bar to rest at the center of a load pan on a balanced scale. Subtract the weight of the bar from the total weight to find the effective weight of the pendulum. The effective pendulum weight should be within 0.4 % of the required weight for that pendulum capacity. If weight must be added or removed, care must be taken to balance the added or removed weight about the center of percussion (striking edge). It is not advisable to add weight to the opposite side of the bearing axis from the striking edge to increase the effective length of the pendulum since the distributed mass will lead to large energy losses from vibration of the pendulum.

X1.13 Calculate the effective length of the pendulum arm, or the distance to the center of percussion from the axis of rotation, by the procedure of Note 5. The effective length must be within the tolerance stated in 5.3.

X1.14 Measure the vertical distance of fall of the pendulum striking edge from the trip height to its lowest point. This distance should be 610 ± 2.0 mm (24 ± 0.1 in.). This measurement may be made by blocking up a level on the top of the vise and measuring the vertical distance from the loading nose to the bottom of the level and subtracting 22.0 mm (0.866 in.). The vertical falling distance may be adjusted by varying the position of the pendulum latch.

X1.15 Notch a standard specimen on one side, parallel to the molding pressure, at 32 mm (1.25 in.) from one end. The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be 10.16 ± 0.05 mm (0.400 ± 0.002 in.). Use a jig to position the specimen correctly in the vise. When the specimen is clamped in place, the center of the notch should be within 1.2 mm (0.005 in.) of being in line with the top of the fixed surface of the vise and the specimen should be centered midway within 0.40 mm (0.015 in.) between the ends of the clamping faces. The notched face should be the striking face of the specimen for the Izod test. Under no circumstances during the breaking of the specimen should the top of the specimen touch the pendulum except at the striking edge.

X1.16 If a clamping-type locating jig is used, examine the clamping screw in the locating jig. If the thread has a loose fit the specimen may not be correctly positioned and may tend to creep as the screw is tightened. A burred or bent point on the screw may also have the same effect.

X1.17 When the pendulum is in position to just touch the test specimen the pointer should be at the full scale index within 0.2 % of scale.

X1.18 The pointer friction should be adjusted so that the pointer will just maintain its position anywhere on the scale. The striking pin of the pointer should be securely fastened to the pointer. Friction washers with glazed surfaces should be replaced with new washers. Friction washers should be on either side of the pointer collar. The last friction washer installed should be backed by a heavy metal washer. Pressure on this metal washer is produced by a thin bent spring washer and locknuts. If the spring washer is placed next to the fiber friction washer the pointer will tend to vibrate during impact.

X1.19 The free swing reading of the pendulum (without specimen) from the tripping height should be less than 2.5 % of pendulum capacity on the first swing. If the reading is higher than this then the pointer friction is excessive or the bearings are dirty. To clean the bearings dip them in grease solvent and spin dry in an air jet. Clean the bearings until they spin freely, or replace them. Oil very lightly with instrument oil before replacing. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

X1.20 The position of the pointer after three swings of the pendulum, each from the starting position, without manual readjustment of the pointer should be 1 % or less of the pendulum capacity. If the readings differ from this, then the machine is out of plumb, the calibration dial is out of alignment, or the pendulum finger is out of calibration position.

X1.21 The shaft about which the pendulum rotates shall have no detectable radial play (less than 0.05 mm (0.002 in.)). An end play of 0.25 mm (0.010 in.) is permissible when a 9.8-N (2.2-lbf) axial force is applied in alternate directions. This shaft shall be horizontal within $\tan^{-1} 0.003$ as checked with a level.

X1.22 The vise faces should be parallel in the horizontal and vertical directions within 0.025 mm (0.001 in.). This may be checked by inserting the machined square metal bar of X1.8 into the vise in a vertical position and clamping until the jaws begin to bind. Any freedom between the metal bar and the clamping surfaces of the jaws of the vise must not exceed the specified tolerance.

X1.23 The top edge of the fixed jaw of the vise shall have a radius of 0.25 ± 0.12 mm (0.010 ± 0.005 in.). This is the edge of stress concentration as the specimen breaks and should be examined carefully.

X1.24 If a brittle unfilled or granular filled plastic bar such as a general-purpose wood-flour-filled phenolic material is available, notch and break a set of bars in accordance with these test methods. Examine the surface of the break of each bar in the vise. If the break is flat and smooth across the top surface of the vise the condition of the machine is excellent. Considerable information regarding the condition of an impact machine can be obtained by examining the broken

sections of specimens. No weights should be added to the pendulum for the above tests.

X1.25 The machine should not be used to indicate more than 85 % of the energy capacity of the pendulum. Extra weights added in pairs on opposite sides of the pendulum at the center of percussion will increase available energy of the machine. Correct weights for any range can be calculated as follows:

$$W = E_p/h$$

where:

W = the effective pendulum weight (see X1.12),

E_p = potential or available energy of the machine, and

h = the vertical distance of fall of the pendulum striking edge (see X1.14).

Each lb of added weight increases the capacity of the machine by 2.710 J (2 ft·lbf).

X2. INSTRUCTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A WINDAGE AND FRICTION CORRECTION CHART

X2.1 The construction and use of the chart herein described is based upon the assumption that the friction and windage losses are proportional to the angle through which these loss torques are applied to the pendulum. Figure X2.1 shows the assumed energy loss versus the angle of the pendulum position during the pendulum swing. The correction chart to be described is principally the left half of Fig. X2.1. The windage and friction correction charts should be available from commercial testing machine manufacturers. The energy losses designated as *A* and *B* are described in 9.3 of the main body of the method.

X2.2 Start the construction of the correction chart (Fig. X2.2) by laying off to some convenient linear scale on the abscissa of a graph the angle of pendulum position for the portion of the swing beyond the free hanging position. For convenience place the free hanging reference point on the right end of the abscissa with the angular displacement increasing linearly to the left. The abscissa is referred to as Scale *C*. Although angular displacement is the quantity to be represented linearly on the abscissa, this displacement is more conveniently expressed in terms of indicated energy read from the machine dial. This yields a nonlinear Scale *C*

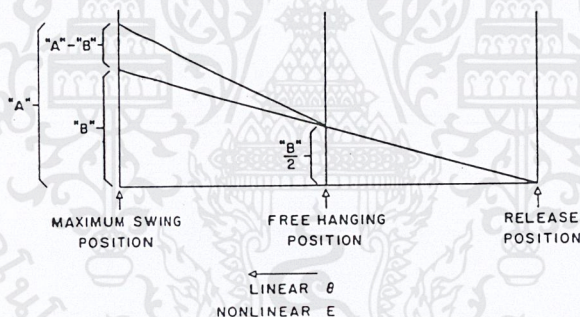


FIG. X2.1 Method of Construction of a Windage and Friction Correction Chart

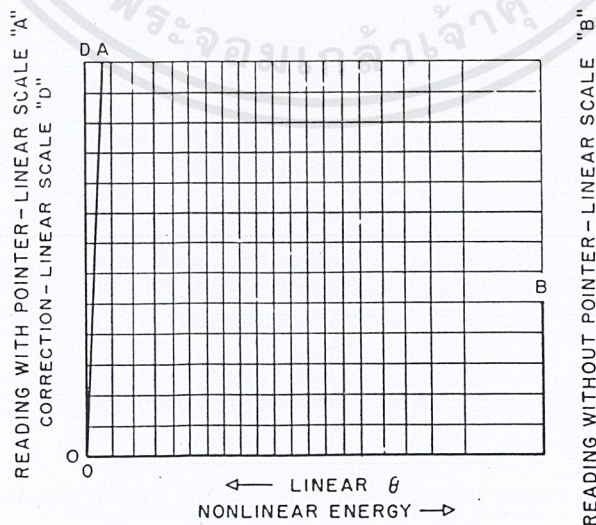


FIG. X2.2 Sample Windage and Friction Correction Chart

with indicated pendulum energy increasing to the right.

X2.3 On the right hand ordinate lay off a linear Scale *B* starting with zero at the bottom and stopping at the maximum expected pendulum friction and windage value at the top.

X2.4 On the left ordinate construct a linear Scale *D* ranging from zero at the bottom to 1.2 times the maximum ordinate value appearing on Scale *B*, but make the scale twice the scale used in the construction of Scale *B*.

X2.5 Adjoining Scale *D* draw a curve *OA* which is the focus of points whose coordinates have equal values of energy correction on Scale *D* and indicated energy on Scale *C*. This curve is referred to as Scale *A* and utilizes the same divisions and numbering system as the adjoining Scale *D*.

X2.6 Instructions for Using Chart:

X2.6.1 Locate and mark on Scale *A* the reading *A*, obtained from the free swing of the pendulum with the pointer prepositioned in the free hanging or maximum indicated energy position on the dial.

X2.6.2 Locate and mark on Scale *B* the reading *B* obtained after several free swings with the pointer pushed up close to the zero indicated energy position of the dial by the pendulum in accordance with instructions in 9.3.

X2.6.3 Connect the two points thus obtained by a straight line.

X2.6.4 From the indicated impact energy on Scale *C* project up to the constructed line and across to the left to obtain the correction for windage and friction from Scale *D*.

X2.6.5 Subtract this correction from the indicated impact reading to obtain the energy delivered to the specimen.

X3. PROCEDURE FOR THE CALCULATION OF WINDAGE AND FRICTION CORRECTION

X3.1 The procedure for the calculation of the windage and friction correction in this appendix is based on the equations developed by derivation in Appendix X4. This procedure can be used as a substitute for the graphical procedure described in Appendix X2 and is applicable to small electronic calculator and computer analysis.

X3.2 Calculate *L*, the distance from the axis of support to the center of percussion as indicated in 5.3. (It is assumed here that the center of percussion is approximately the same as the center of gravity.)

X3.3 Measure the maximum height, *h_M*, of the center of percussion (center of gravity) of the pendulum at the start of the test as indicated in X1.14.

X3.4 Measure and record the energy correction, *E_A*, for windage of the pendulum plus friction in the dial, as determined with the first swing of the pendulum with *no* specimen in the testing device. This correction must be read on the energy scale, *E_M*, appropriate for the pendulum used.

X3.5 Without resetting the position of the indicator obtained in X3.4, measure the energy correction, *E_B*, for pendulum windage after two additional releases of the pendulum with *no* specimen in the testing device.

X3.6 Calculate β_{max} as follows:

$$\beta_{max} = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_A/E_M)]\}$$

where:

E_A = energy correction for windage of pendulum plus friction in dial, J (or ft·lbf),

E_M = full-scale reading for pendulum used, J (or ft·lbf),

L = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m (or ft),

h_M = maximum height of center of gravity of pendulum at start of test, m (or ft), and

β_{max} = maximum angle pendulum will travel with one swing of the pendulum.

X3.7 Measure specimen breaking energy, *E_s*, J (or ft·lbf).

X3.8 Calculate β for specimen measurement *E_s* as:

$$\beta = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)]\}$$

where:

β = angle pendulum travels for a given specimen and

E_s = dial reading breaking energy for a specimen, J (or ft·lbf).

X3.9 Calculate total correction energy, *E_{TC}*, as:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{max}) + (E_B/2)$$

where:

E_{TC} = total correction energy for the breaking energy, *E_s*, of a specimen, J (or ft·lbf), and

E_B = energy correction for windage of the pendulum, J (or ft·lbf).

X3.10 Calculate the impact strength using the following formula:

$$I_s = (E_s - E_{TC})/t$$

where:

I_s = impact strength of specimen, J/m (or ft·lbf/in.) width, and

t = width of specimen or width of notch, m (or in.).

X4. DERIVATION OF PENDULUM IMPACT CORRECTION EQUATIONS

X4.1 From right triangle distances in Fig. X4.1:

$$L - h = L \cos \beta \quad (1)$$

X4.2 But the potential energy gain of pendulum *E_p* is:

$$E_p = hW_p g \quad (2)$$

X4.3 Combining Eqs 1 and 2 gives the following:

$$L - E_p/W_p g = L \cos \beta \quad (3)$$

X4.4 The maximum energy of the pendulum is the potential energy at the start of the test, *E_M*, or

$$E_M = h_M W_p g \quad (4)$$

X4.5 The potential energy gained by the pendulum, *E_p*, is related to the absorption of energy of a specimen, *E_s*, by the following equation:

$$E_M - E_s = E_p \quad (5)$$

X4.6 Combining Eqs 3, 4, and 5 gives the following:

$$(E_M - E_s)/E_M = L/h_M (1 - \cos \beta) \quad (6)$$

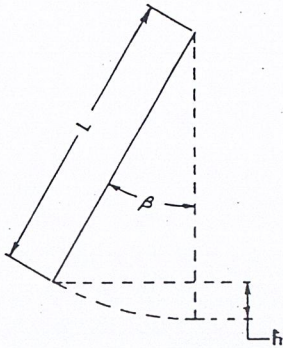


FIG. X4.1 Swing of Pendulum from Its Rest Position

X4.7 Solving Eq 6 for β gives the following:

$$\beta = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)]\} \quad (7)$$

X4.8 From Fig. X4.2, the total energy correction E_{TC} is given as:

$$E_{TC} = m\beta + b \quad (8)$$

X4.9 But at the zero point of the pendulum potential energy

$$E_B/2 = m(0) + b \quad (9)$$

or

$$b = E_B/2 \quad (10)$$

X4.10 The energy correction, E_A , on the first swing of the pendulum occurs at the maximum pendulum angle, β_{max} . Substituting in Eq 8 gives the following:

$$E_A = m\beta_{max} + (E_B/2) \quad (11)$$

X4.11 Combining Eqs 8 and 11 gives the following:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{max}) + (E_B/2) \quad (12)$$

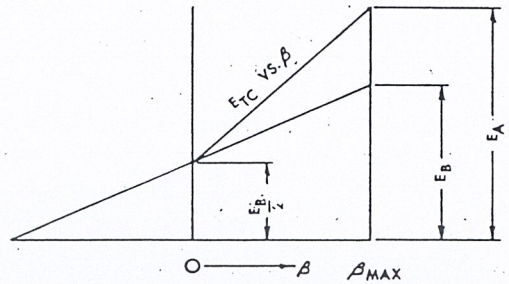


FIG. X4.2 Total Energy Correction for Pendulum Windage and Dial Friction as a Function of Pendulum Position

X4.12 Nomenclature:

- b = intercept of total correction energy straight line,
- E_A = energy correction including both pendulum windage plus dial friction, J,
- E_B = energy correction for pendulum windage only, J,
- E_M = maximum energy of the pendulum (at the start of test), J,
- E_p = potential energy gain of pendulum from the pendulum rest position, J,
- E_s = uncorrected breaking energy of specimen, J,
- E_{TC} = total energy correction for a given breaking energy, E_s , J,
- g = acceleration of gravity, m/s²,
- h = distance center of gravity of pendulum rises vertically from the rest position of the pendulum, m,
- h_M = maximum height of the center of gravity of the pendulum, m,
- m = slope of total correction energy straight line,
- L = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m,
- W_p = weight of pendulum, as determined in X1.12, kg, and
- β = angle of pendulum position from the pendulum rest position.

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 reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

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.

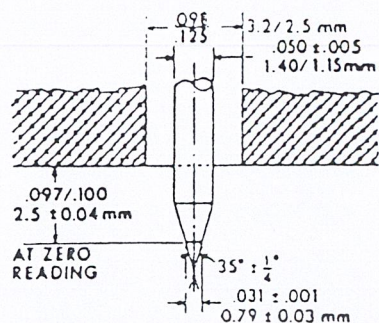
5.1.5 *Calibrated Spring*, for applying force to the indenter in accordance with Fig. 1.

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.

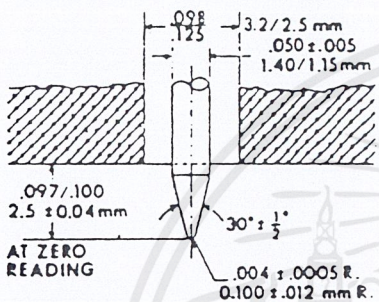
² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

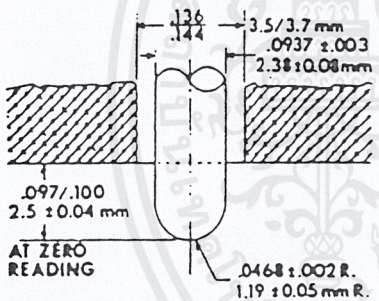
⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.02.



(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.

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

where H_{co} = 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 × Sr, measurement units.
^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).
^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.
^E R = reproducibility = 2.83 × 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 × Sr, measurement units.
^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).
^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.
^E R = reproducibility = 2.83 × 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 the 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.

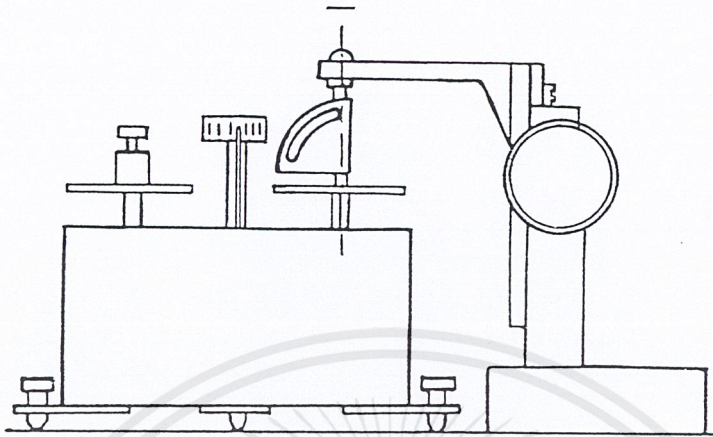


FIG. 2 Apparatus for Calibration of Durometer Spring

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 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C 177; 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 and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This test method covers the achievement and measurement of steady-state heat flux through flat-slab specimens using a guarded-hot-plate apparatus. The method encompasses both the single-sided and the double-sided mode of measurement. Both distributed and line source guarded heating plate designs are included, in principle, in this test method. The reader should consult the standard practices on the single-sided mode of operation and on the line source apparatus for further details on these variations of the method.

1.2 The calculations of thermal transmission properties based upon measurements using this method shall be performed in conformance with Practice C 1045.

1.3 This is an absolute (or primary) method of measurement since no heat flux reference standards are required except to confirm accuracy statements and to establish traceability to recognized standards. This absolute method is contrasted with a comparative (or secondary) method, such as Test Method C 518, in which the results are directly dependent on heat flux reference standards.

1.4 This test method is applicable to the measurement of a wide variety of specimens, ranging from opaque solids to porous or transparent materials, and a wide range of environmental conditions. Special precautions in the measurement process are described for the following:

1.4.1 Specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or extremes of thermal flux density.

1.4.2 Measurements conducted at extremes of temperature (either high or low) or under vacuum conditions.

1.5 This test method is intended to allow a wide variety of apparatus designs and design accuracies to satisfy the requirements of specific measurement problems. Compliance with this test method requires a statement of the uncertainty of each reported variable in the report. Therefore, in the following sections, the significant error factors will be discussed.

1.6 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is*

the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations²

C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials²

C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus²

C 687 Practice for Determination of the Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation²

C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements²

E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples³

2.2 Adjunct:

Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs (C 177)⁴

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Definitions C 168.

3.2 Description of Term Specific to this Standard:

3.2.1 *heat flux*—the term heat flux is not defined in Definitions C 168; it is used here as synonymous with heat flow.

4. Significance and Use

4.1 This test method covers the measurement of heat flux and associated test conditions for flat-slab specimens. Since heat flux and its uncertainty may be dependent upon environmental and apparatus test conditions, as well as intrinsic characteristics of the specimen, the report for this test method must include a thorough description of the specimen and of the test conditions. Also, since this test method is applicable to a wide range of specimen characteristics, test conditions, and apparatus design, it is impractical to give an all-inclusive statement of precision and bias for the

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Oct. 22, 1985. Published December 1985. Originally published as C 177 – 42 T. Last previous edition C 177 – 76.²

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.06.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

⁴ Available at a nominal cost from ASTM Headquarters, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103. Request PCN No. 12-301770-00.

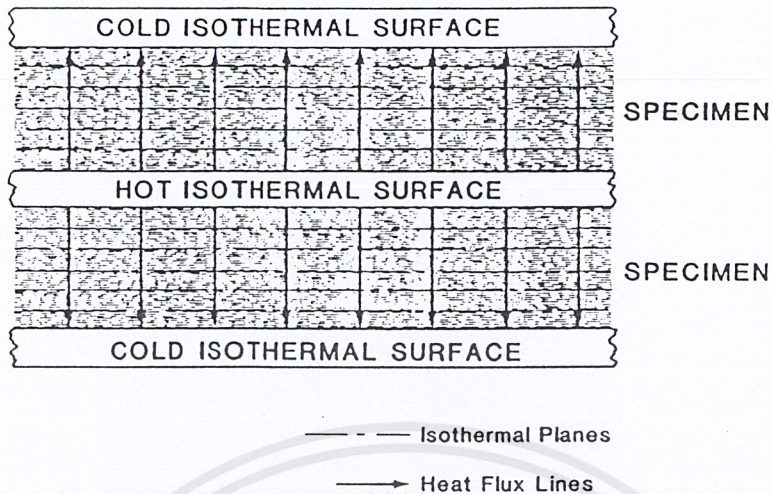


FIG. 1 Schematic of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

test method. For this reason, conformance with the test method includes the requirement that the user must estimate and report the uncertainty of the results under the reported test conditions. Based on the heat flux measurements conducted with this method, thermal transmission properties shall be calculated in conformance with Practice C 1045.

5. Principle of the Experimental Method

5.1 This section discusses both the idealized principle of the method and the deviations from this that are encountered in practice. Figure 1 illustrates the core components of the idealized system: two isothermal cold surface units and a guarded isothermal hot-surface unit. The guarded isothermal hot-surface unit is composed of the metered area unit and a concentric guard unit. Sandwiched between these three units (as illustrated in Fig. 1) is the material to be measured, that is, the specimen. In the double-sided mode of measurement, the specimen is actually composed of two pieces. The measurement in this case produces a result that is the average of the two pieces and therefore it is important that the two pieces be as identical as possible. In the one-sided mode of measurement only one of the pieces is measured and therefore they do not have to be identical. However, the backflow specimen is needed and it should have thermal properties similar to the specimen. In further discussion, specimen will be used to denote either one piece or two pieces unless further clarification is needed. The metered area unit is the portion of the assembly that provides the power (heat flow per unit time) for the measurement and defines the actual test volume, that is, that portion of the specimen that is actually being measured.

5.1.1 The function of the guard portion of the isothermal hot surface unit is to provide the additional power necessary to create the proper thermal conditions within the test volume. In the idealized case, the guard portion can be thought of as infinite in width. The proper (idealized) conditions are illustrated in Fig. 1 by the configuration of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux density within the specimen. The isothermal surfaces are planes that

are parallel to each other and to the three core components. In addition, the lines of constant heat flux density are perpendicular to these planes and are uniformly distributed throughout the metered area. The establishment of the above idealized conditions simply means that there are no radial components of heat flow within or immediately adjacent to the test volume.

5.1.2 Deviations from the idealized configuration are caused by: (a) specimen inhomogeneities, (b) temperature differences between the metered unit and the guard unit (gap unbalance), and (c) temperature differences between the outer edge of the assembly and the surrounding environment (edge unbalance). These experimental realities lead to distortions of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux density within the test volume. Consequently, the power supplied to the metered area unit is not exactly equal to that which flows through the test volume. The measured power can be either too small or too large depending on the direction of the above-mentioned unbalances. The resulting actual heat flows are qualitatively indicated in Fig. 2.

5.2 The three heating/cooling units are designed to create isothermal surfaces on the faces of the specimens within the

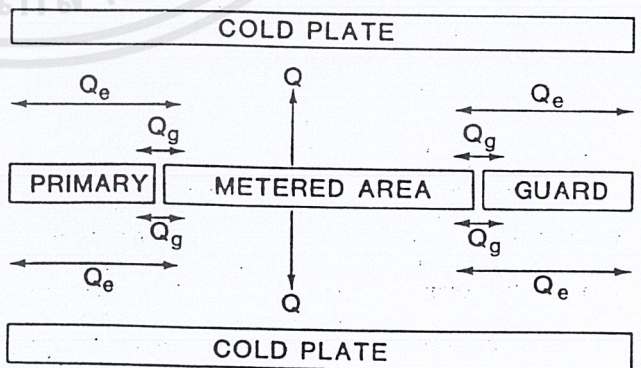


FIG. 2 Illustration of Specimen Heat Flux, Q , Gap Heat Flux, Q_g , and Edge Heat Flux, Q_e

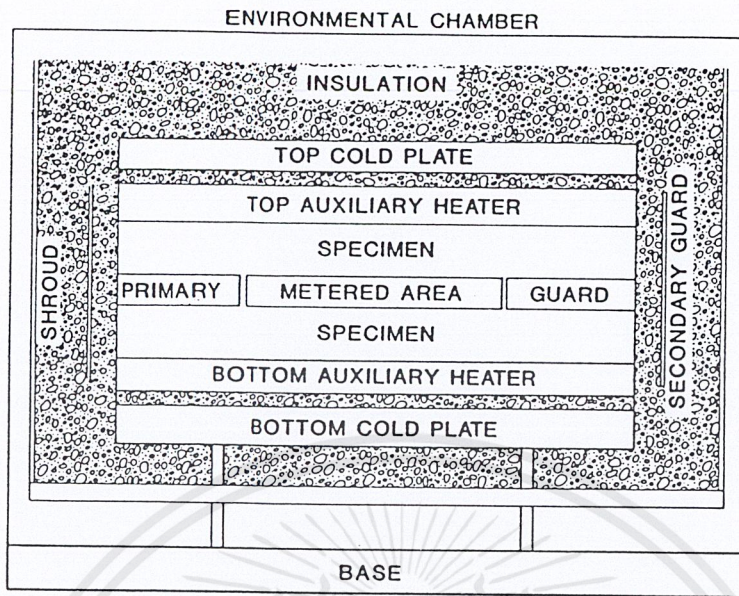


FIG. 3 General Arrangement of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

metered region. The two surfaces designated as the cold isothermal surfaces are adjusted to the same temperature for the double-sided mode of operation (that is, two specimens are measured). In the single-sided mode of operation (that is, only one specimen is measured) the temperature of one of the surfaces designated as the cold isothermal surface is adjusted to be equal to the temperature of the central plate. Because the plates and specimens are of finite dimensions and because the external environment is at a temperature distribution different from the edge of the metered region, some radial heat flow occurs in practice. The guard for the metered region limits the magnitude of the radial heat flux in the metered region. The effectiveness of the guard is determined, in part, by the ratio of its radial dimension to that of the metered region and to the specimen thickness.

5.3 Compliance with this test method requires: (a) the establishment of steady-state conditions, and (b) the measurement of the unidirectional heat flux in the metered region, the metered area, the temperatures of the hot and cold surfaces, the thickness of the specimens, and other parameters which may affect the unidirectional heat flux through the metered region of the specimen.

6. Apparatus

6.1 *Guarded-Hot-Plate Apparatus*—The term “guarded-hot-plate apparatus,” applies to the entire plate-specimen system and associated control and measuring components. The general arrangement of the mechanical components of such a system are illustrated in Fig. 3. This system consists of a guarded heating unit, two auxiliary heating plates, two cooling units, secondary guarding in the form of edge insulation, and a temperature-controlled secondary guard. The system illustrated in Fig. 3 contains components frequently omitted in systems designed for ambient condition measurements. The environmental chamber may not be necessary if atmospheric air is used for the fill gas. The

auxiliary heater plates and offset insulation are generally not used for tests conducted with the cold surfaces near room temperature. The secondary guard is not essential if both hot and cold surfaces are near room temperature.

6.1.1 Two essentially identical specimens are placed on either side of the guarded heating unit. (In the single-sided mode of operation the specimens need not be identical.) The opposite faces of the specimens are in contact with the auxiliary heating units. The purpose of these three isothermal units is to create an accurately measurable steady-state heat flux unidirectionally through the two specimens (one specimen in the single-sided mode). The purpose of the secondary guard and edge insulation is to further reduce radial heat flow. The cooling units are isothermal heat sinks to remove the energy generated by the heating units. In the double-sided mode of operation the auxiliary heating units are adjusted so they are at the same temperature. In the case of single-sided operation, the temperature of one of these units is adjusted to equal the temperature of the guarded heating unit, thus resulting in heat flow in only one direction. Although this has been done successfully see Refs. (1), (2), and (3),⁵ the preponderance of experience is with the double-sided mode of operation. It is also noted that the apparatus can be operated with either vertical heat flow or horizontal heat flow. The results of the two orientations can be different due to differences in convective heat flow. For further details on the construction of a guarded-hot-plate apparatus see Refs. (1), (2), (3), and (4).

6.2 Guarded Heating Unit:

6.2.1 *Surface Plates and Core Heater*—The guarded heating unit consists of two concentric, thermally-isolated, heater-surface plate sections. Both round and square units

⁵ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

have been used successfully. The inner heater-surface plate section is the metered region, while the outer heater-surface plate section is the primary guard region. The width of the guard region is typically equal to about one-half of the linear dimension of the metered region to reduce edge heat loss to an acceptable level. This primary guard section, in some cases, is further divided into two concentric sections (double guard) with a gap separator to improve the guard effectiveness. The surface plates of this unit shall be sufficiently rigid to maintain the reported flatness and parallelism, measured as a percentage of the maximum linear dimension of the metered region. The surface plates should have a high thermal conductivity, compared to the specimen thermal conductivity, to ensure that the plates are sufficiently isothermal. For ambient and low temperature measurements, high-thermal conductivity metal plates are generally recommended. This is especially important when measuring inhomogeneous specimens. The core heater of this heating unit should be installed to produce a uniform distribution of heat flux density over the entire assembly. It should be symmetrically centered in the axial direction to maintain equal temperatures on the opposing faces of the heating unit. Deviations from this condition can lead to difficulties in proper adjustment of the primary guard temperature, and may cause unsuspected radial heat flow from the metered region to the guard region. Thermal resistances in the axial direction within the heating unit should be minimized. This is especially significant when operating in the single-sided mode because of the axial asymmetry of heat flux.

6.2.1.1 When the heat flux through the specimen for a given ΔT is dependent on plate emittance, that is, the specimen is not totally opaque, the plate emittances shall be reported. For insulation measurements, the plates are generally coated to maintain an emittance of 0.8 to 0.9 to approximate common end-use conditions. The plate emittance requirement should be specified in the appropriate material specification. The importance of this emittance specification increases with decreasing specimen density, decreasing thickness, and increasing temperature because radiant heat transfer generally increases under these conditions.

6.2.1.2 Construction materials shall be chosen to ensure adequate capacity and compatibility under extreme operating conditions. At extremes of temperature, one should be cautious of warpage. At high temperatures, normally good electrical insulations may allow stray power exchanges within the heating unit. Under high vacuum conditions surface-to-surface thermal contact resistances may become unacceptably high and non-uniform.

6.2.2 *Gap*—The gap between the concentric meter/guard heaters shall be uniform, and its width should be optimized to minimize gap heat flow while simultaneously minimizing temperature distortion effects within the specimen near the gap. In the past, it was recommended that the total gap area be as small as possible. Recent studies (1), (5), (6), (7), and (8) have shown that the optimum value is dependent on apparatus design, operating range, and specimen characteristics. Most past experience is based on gap areas that are about 5 % of the metered area. To reduce the heat flow across the gap, any connections between the metering section and the primary guard should have a high thermal resistance,

that is, they should be as small in thermal cross-section and as long as possible. Traversing the gap at an oblique angle is recommended. The gap region shall be instrumented with temperature unbalance sensors to monitor and control the average temperature unbalance across the gap. Fine-gage thermocouples connected as thermopiles are often used for this purpose, although other temperature control sensors, such as thermistors have been used. Highly alloyed thermocouple wires, rather than pure metals, should be used to maximize the thermal resistance across the gap. Because of nonuniform heat flux within the plates, temperature imbalance is not always constant along the whole gap. It has been found that with proper design the thermal conductance of the wires crossing the gap can be made relatively small and, therefore, a large number of elements can be used to increase the gap unbalance sensitivity. It is not uncommon to use ten or more sensing elements. When using only a minimum number of sensing elements along the gap, the most representative positions to detect the average balance for a square plate are those at a distance from the corners equal to one-fourth of the side of the metering section (5). The corners and the axes should be avoided. For a round plate, the sensors should be spaced equally around the gap. The gap unbalance sensors should be placed on both surface plates of the guarded heating unit to average the unbalance on both faces of the heating unit. It is also desirable to provide for gap unbalance readout from each surface separately (3). Any leads crossing the gap should be thermally anchored to the primary guard to provide a heat sink for external thermal variations. In some instances it may be desirable to provide a heat sink for these leads outside the primary guard to further minimize radial heat flow (8).

6.3 *Cooling/Auxiliary Heating Units*—It is recommended that the surface dimensions of the cooling and auxiliary heating units (when used) be the same as or larger than those of the guarded heating unit. These units shall have the same flatness, parallelism, conductivity, emittance, and heat distribution requirements as the guarded heating unit. Generally, the temperature of the cooling units is controlled with a circulating constant-temperature fluid. The auxiliary heating units are electrically controlled, and are constructed similar to the guarded heating unit, but usually without a gap.

6.4 *Secondary Guarding*—When the test conditions are significantly different from room conditions, secondary guarding of the specimen-plate assembly may be necessary. For example, if either the hot or cold plate test temperatures are more than 25 K different from room temperature, edge insulation is likely to be necessary. Edge insulation or an environmental chamber will also help eliminate spurious effects of room drafts. If the test temperatures differ more significantly from room temperatures, a secondary controlled-guard will likely be necessary. This usually takes the form of an electrically-controlled concentric heater surrounding the region from cold plate to cold plate. The concentric gap between it and the specimen-plate stack should be uniform and optimized to achieve a high gap thermal resistance and a small “window” to outside conditions. A gap width of approximately 2 cm has been found to be adequate for a 20-cm diameter plate. Further, if conditions must be maintained within the specimen-plate stack, that are different from the room conditions, an environ-

mental chamber must be added. This is necessary for: (a) low temperature measurements to prevent condensation; (b) fill gases other than air, and (c) measurements with vacuum (1) and (3).

6.5 Temperature Measuring and Control Sensors—Any temperature sensor-readout system possessing an accuracy consistent with the required error analysis may be used for measurement and control of the temperatures within the system. Plate surface temperatures are often measured by embedding sensors, such as thermocouples, in grooves in the working surface. In some instances, such as with rigid specimens and high heat flux, it will be necessary to mount the sensors on the surface of the specimen. For heat flux densities above about $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ alternate temperature sensing should be considered. Many existing systems utilize a minimum of two temperature sensors to determine the average temperature of each isothermal surface. However, to determine the actual surface temperature variations under typical operating conditions, the temperature must be sampled at considerably more than two points. This is especially true when the specimen surface temperature itself must be measured or when the specimen is highly inhomogeneous. Therefore, no strict specification is given as to the number of temperature sensors that must be used for each surface. However, the user must report the uncertainty of the temperature measurement, including the component, due to temperature nonuniformity across the surface. This determination is probably best done with a multijunction thermocouple in ad-hoc experiments and not part of every measurement. Precautions should be taken to assure that heaters and temperature sensors are thermally anchored to the surface involved. Temperature gradients along the leads leading to temperature sensors should be minimized. The subject of thermal anchoring is discussed in Ref (9).

6.5.1 Normal precautions should be used to minimize spurious voltages in temperature control and measuring circuits. Spurious voltages, due to wire inhomogeneities, generally increase as the temperature gradients within the measuring leads increase. Therefore, spurious voltages will be larger for measurements at temperatures appreciably different from room temperature. For the same reason, junctions between dissimilar metal leads should not be made in the regions of appreciable temperature gradients. High quality, low thermal switches should be used in the temperature measurement circuits. The sensitivity of metallic temperature sensors generally decreases with decreasing temperature, and therefore, the above procedures become more important at low temperatures. Since the temperature difference between the two specimen surfaces enters directly into the determination of derived thermal properties, it is frequently better to connect the temperature sensors in a differential manner rather than subtracting the results of two temperature measurements. Care must be taken to avoid more than one electrical ground, especially when using the differential arrangement.

6.5.2 Temperature sensors must be calibrated to within the uncertainty allowed by the apparatus design accuracy. For information concerning sensitivity and accuracy of thermocouples see Table 1 of Tables E 230. For a comprehensive discussion on the use of thermocouples, see Ref (10):

For low temperature thermocouple reference tables, see Ref (11).

6.6 Thickness Measurement—A means shall be provided for the measurement of the specimen thickness under test conditions. If the specimen is rigid, its room temperature thickness (along with thermal expansion corrections if necessary) can be used for the actual thickness. If the specimen is compressible under operating plate pressure, a means must be provided to maintain a known plate spacing. This is often done with three or more low-conductance rigid spacers placed at the outer periphery between the guarded heating unit and the cooling units (auxiliary heating unit, if used). The thickness is taken as the average length of the spacers corrected for thermal expansion. Other methods of plate positioning and thickness determination are common, especially when the plates are positioned for horizontal heat flow. It is also helpful for uncertainty analysis to determine the variation of thickness within the metered area under operating conditions.

6.7 Power to Metered Region—The power to the metered region is determined with a wattmeter or from voltage and current measurements across the heater in the metered region. The user should note that ac power determinations are more prone to error than dc measurements. Therefore, dc power is recommended for the metered region heater. The voltage taps for this measurement should be placed to measure the voltage to the mid-point of the guarded heating unit gap. The current is normally determined from the voltage drop across a precision resistor placed in series with the metered region heater.

6.7.1 Care should again be taken to minimize the thermal gradients in the voltage and current wires leading to the metered heater, and the current leads should be adequately sized to prevent significant self-heating under maximum power conditions. Within this limitation both sets of leads should be as fine as possible to limit radial heat losses.

7. Test Procedure

7.1 The testing procedure includes the following steps:

- 7.1.1 Specimen selection,
- 7.1.2 Specimen preparation and installation,
- 7.1.3 Establishing thermal steady-state, and
- 7.1.4 Data acquisition.

7.2 Specimen Selection—Only those specimen selection factors important to the performance of the apparatus are considered here. Those factors dictated by the objectives related to obtaining derived thermal properties are described in Practice C 1045 and material specifications. For the two-sided mode of operation, the two specimens should be selected to be as similar in thickness and thermal characteristics as possible.

7.2.1 Size—The maximum specimen thickness that can be measured to a given accuracy is dependent on several parameters, including the size of the apparatus, thermal resistance of the specimen, and the accuracy desired. To maintain edge heat losses to below about 0.5 %, for a guard width that is about one-half the linear dimension of the metered region, the recommended maximum thickness of the specimen is one-third the maximum linear dimension of the metered region. For more specific quantitative information on this limitation see Refs (1), (5), (7), and (8).

7.2.1.1 The specimen shall be sized to cover the entire metered region. In most instances it is desirable to cover the gap between the metered region and the guard as well. The guard portion of the volume between the heating and cooling plates should be filled with material having characteristics similar to the specimen.

7.2.2 *Homogeneity*—There are two potential problems in determining the heat flux through highly inhomogeneous specimens. One is related to the interpretation and application of the resulting data; it is discussed in Practice C 1045. The other is connected with the degradation in performance of the apparatus. If the specimen itself is highly inhomogeneous, that is, the heat flux density varies appreciably over the metered area, several errors can be significantly increased. The plate temperature distribution can deviate appreciably from isothermal conditions which, in turn, can cause large uncertainties in the average temperature difference across the specimen. The increased plate temperature variations can also lead to increased gap and edge heat losses. The importance of measuring the plate or specimen surface temperatures at numerous points is greatly increased under such conditions.

7.3 *Specimen Preparation*—Preparation and conditioning of the specimens shall be in accordance with the appropriate material specification. The following guidelines are given when the material specification is incomplete or unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to assure uniform thermal contact with the heating and cooling plates.

7.3.1 *Compressible Specimens*—For compressible specimens the surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively rough so long as these undulations essentially vanish under test compression. Under more extreme conditions, it may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, the measured R value will be smaller than the R value that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers need to be used for the measurement of compressible specimens (see 6.6).

7.3.2 *Rigid and High Conductance Specimens*—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires more careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the heating plate. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate. However, if the interface resistance is too high, other techniques that assure good thermal contact and accurate temperature measurement will be necessary.

7.3.2.1 In some cases it is necessary to mount the temperature sensors directly on the specimen surfaces. Under vacuum conditions, the slightest space between plate and specimen is essentially an infinite thermal resistance (except for radiative heat transfer). Under these conditions extreme heat flux nonuniformities will occur. In any event the user should always try to minimize the ratio of contact resistance

to specimen resistance and to strive for a constant ratio over the entire surface.

7.3.2.2 Another potential solution (that must be used with caution) is to mount a compressible thin sheet (for example, a soft rubber) between the plates and specimen to improve the uniformity of the thermal contact. If the thermal conductance of the thin sheet is known, temperature corrections can be applied to the measured plate temperatures to obtain the specimen surface temperatures. Clearly the thermal resistance of the thin sheets should be small compared to the specimen thermal resistance, otherwise the temperature correction uncertainty will cause excessive errors in the specimen surface temperatures.

7.3.3 *Anisotropic Specimens*—The measurement of highly anisotropic specimens may result in significantly larger errors than for isotropic specimens. For example, layered specimens that have a high lateral to axial conductance ratio require special attention. For such specimens, it is recommended that a low conductance gap be created in the specimen directly in line with the gap in the main plate. Specimens whose axes of symmetry do not coincide with flat-slab geometry are not recommended for measurement by this test method because the results will be ambiguous due to increased measurement errors as well as data interpretation.

7.3.4 *Loose-Fill Specimens*—The determination of thermal properties for loose-fill specimens requires special handling, conditioning, and measurement techniques. The user is directed to Practice C 687 for details on loose-fill measurements.

7.4 *Test Execution:*

7.4.1 *Preliminary Preparation*—After installation of the specimen and installation of appropriate secondary guarding and an environmental chamber (if necessary), the thermal test procedure begins. If the test is to be conducted with other than air within the specimen-plate assembly, the environmental chamber should be purged and backfilled with the desired gas. Care should be observed to limit the pressure of the fill-gas to below its condensation point at the lowest temperature within the chamber. Since the measured heat flux is dependent on both the species of fill-gas and pressure, the report should include this information along with other pertinent specimen characteristics. The various heating and cooling units are placed into operation to achieve the test temperature conditions.

7.4.2 *Thermal Steady-State*—The time required to achieve thermal steady-state of the system varies considerably with the characteristics of the apparatus design, the specimen to be measured, and the test conditions. Generally, however, since this test method is applicable to low conductance specimens, the settling time is on the order of hours. Settling times generally increase with thicker specimens, specimens with low thermal diffusivity, and the mass of the guarded heater. After achievement of the desired steady-state, three successive repeat data acquisition runs shall be completed. These runs shall be conducted at intervals of no less than 30 min. Longer times may be necessary for thermally massive systems. It is recommended that the intervals be no less than the thermal time constant of the system (see Note 1). This combination of three runs shall be considered a valid test if each datum obtained for each

measured variable differs from the mean by no more than the uncertainty of that variable as estimated to establish the values given in the report. If the data obtained change monotonically with time, the test shall be considered suspect and further repeat runs shall be conducted until this steady drift is no longer observed. Such a drift, even at low levels, may indicate that the specimen characteristics are changing or that the system is not at steady-state within its test capabilities. In either event, serious errors may result. For further details see Refs (3), (12), and (13).

NOTE 1—The thermal time constant of the system is the time required to come to within $1/e$ (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. This time is strongly dependent on the mode of operation. The two modes of operation generally used are: (a) constant power to the plates, and (b) constant temperature control of the plates. The thermal time constant for the latter mode is usually considerably shorter because it is not dependent on the mass of the plates. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant temperature mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from a knowledge of the thermal diffusivities of the components of the system, but it is more readily determined experimentally.

7.4.3 *Final Checks*—Upon completion of the thermal measurements, the specimen should be removed and the system components, such as temperature sensor mounting, should be examined for proper placement and operation. The specimen thickness spacers should be checked to ensure accuracy. If the specimen is a conditioned thermal insulation, its mass should be redetermined to detect changes during the test procedure. Any changes in the physical characteristics of the specimen should be noted. If the specimen is rigid, its thickness should be checked for an irreversible change during the test.

8. Calculation

8.1 The primary data required for this test method include electrical power, surface temperatures, area, and thickness. Of these, only thickness is generally a directly-measured quantity. The others are either calculated from other more fundamental measurements or are converted by an electrical device. The manner in which these variables can be obtained is discussed below.

8.2 *Heat Flux*—The heat flux to be reported is that which passes through each specimen. For the single-sided mode of operation this is equal to the power generated by the metered region heater. For the double-sided mode of operation, only one-half the power generated by the heater flows through each specimen. The power, Q , is frequently determined from emf, E , and current, I , measurement, and is calculated as follows:

$$Q = E \cdot I \quad (1)$$

8.3 *Metered Area*—The metered area, A , is obtained from the area, A_m , of the metered region plate and the gap area, A_g . If there is no discontinuity in specimen characteristics in the gap region, it is calculated as follows:

$$A = A_m + A_g/2 \quad (2)$$

If there is a discontinuity between the specimen in the metered region and the guard region, this equation is

modified slightly to include the effect of heat flux distortion in the gap region:

$$A = A_m + A_g \lambda_g / (2\lambda) \quad (2)$$

where:

λ_g = thermal conductivity of the material in the guard region, and

λ = thermal conductivity of the specimen in the metered region.

8.4 *Temperature*—Again, the basic measurement here is voltage (for a thermocouple) or voltage and current for a resistive temperature sensor. These data are normally converted to temperature through a formula based on a calibration curve or interpolation of a table. In some instances, the formula is packaged within an instrument that reads directly in temperature. In any event, the user should note that the total error contains components due to the measurement process and the calibration (including the error caused by the functional or tabular interpolation of the calibration).

8.5 *Density*—The specimen density is to be reported. The equation for density, ρ is the following:

$$\rho = M/V \quad (4)$$

where:

M = mass of the specimen, kg, and

V = volume that the specimen occupies between the plates under test conditions.

To minimize the error caused by specimen inhomogeneity it is best to determine the density of the specimen within the metered volume. This requires cutting out the metered position of the specimen for the mass determination. The volume is determined from the metered area and the in-situ specimen thickness. In the case of compressible specimens the plate spacing is used for specimen thickness.

8.6 *Thermal Transmission Properties*—The properties included are thermal conductance, thermal resistance, thermal conductivity, and thermal resistivity as defined by Definitions C 168. These quantities shall be reported only in accordance with the requirements and restrictions of Practice C 1045. In addition to reporting the systematic and random uncertainty of these properties, the range of applicable conditions must be reported. These include mean temperature or temperature range, specimen thickness, density, and plate emittance. Other variables that affect thermal transmission, such as fill-gas and pressure, shall also be specified when applicable.

9. Precision and Bias⁶

9.1 The accuracy or uncertainty of a measured result indicates the probable or possible difference between the measured value and the true value. It is obtained by considering the combined effects of precision (random errors) and bias (systematic errors). Past experience (recent unpublished round-robin studies and Refs (3), (4), (14), (15), (16), and (17)) has provided the following accuracy guide lines. It should be noted, however, that the accuracies given here may be either too large or too small depending on the care taken in the construction and operation of each individual apparatus.

⁶ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request R1 C16-1009.

9.1.1 *Case 1, Low Density Compressible Thermal Insulations for Ambient Temperature Applications*—An accuracy of $\pm 2\%$ can be achieved for this category of measurements. Most of the experience is for specimen thicknesses of approximately 2 to 8 cm, metered region dimensions of from 10 to 50 cm, heat flux densities in the range of 2 to 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ at mean temperatures of from -20 to 40°C , temperature differences of about 25°C , and plate emittances near 0.9.

9.1.2 *Case 2, High Density Rigid Specimens for Ambient Temperature Applications*—The accuracy of this category of measurements is somewhat poorer than Case 1, primarily because of the difficulty of establishing the specimen surface temperatures and the higher conductance of such specimens. An accuracy of about $\pm 5\%$ can be achieved. The conditions are approximately the same as Case 1 except that the heat fluxes are generally 10 to 100 times greater, and the apparatus dimensions are usually smaller.

9.1.3 *Case 3, Extreme Conditions*—This category includes measurements under conditions that significantly depart from the above conditions. Some examples are given below:

9.1.3.1 *Extremes of Mean Temperature*—As the mean temperature departs progressively from ambient, the uncertainty becomes greater, and experience is more limited. Uncertainties of $\pm 5\%$ and greater may be expected at mean temperatures above 100°C and below -100°C .

9.1.3.2 *Extremes of Thickness*—At small thicknesses (below 0.5 cm) systematic errors will increase because of the difficulty in determining the average thickness, and because of the relative size of the plate-to-specimen thermal resistance. The guarded-hot-plate is used frequently for such measurements. At large thicknesses (above 30 cm) there is little experience, but errors are expected to be above $\pm 2\%$ especially if the user is not careful in observing the problems associated with longer thermal time constants and larger edge heat losses.

9.1.3.3 *Extremes of Heat Flux Density*—The guarded-hot-plate is not well suited for such measurements. At very high heat flux densities (above about $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) the plate-to-specimen contact resistance uncertainty can result in large temperature measurement errors. Variations in contact resistance along the surface of the specimen also lead to excessive heat flux density variations through the specimen. At very low heat fluxes (below about $0.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) errors become excessively large due to the effect of radial losses, inaccurate power determination, and inaccuracies due to temperature drift of the heater plate. Errors as large as 50% can occur under combinations of extreme conditions.

9.2 The precision and bias statement required by this test method is based upon consideration of the random and systematic components of the following measurement uncertainties:

9.2.1 Uncertainty in heat flow, δQ ,

9.2.2 Uncertainty in temperature difference, $\delta\Delta T = \delta(T_H - T_C)$,

9.2.3 Uncertainty in metered area, δA , and

9.2.4 Uncertainty in specimen thickness, δL .

9.2.5 Other specimen characterization and test condition data may need to be reported. The precision and bias of these data are to be reported to the extent they have a direct

bearing on the accuracy of the results. Prescribed precision and bias of the primary data are not mandated by this test method. However, it is required that the user assess and report the precision and bias of the data. The discussion below provides guidelines to assist the user in performing this uncertainty assessment. A variety of helpful performance checks are included in this discussion. In the following discussion both random and systematic errors are considered. The subscript s is used to denote systematic, and the subscript r is used for the random components.

9.2.5.1 *Systematic error, δ_s* , is any component of error that remains fixed during the runs that constitute a successful test. To simplify the discussion, this does not include any components of error that are known both in magnitude and sign. Under such circumstances, the user should make appropriate corrections and supply the justification for them. The task of estimating the remaining systematic errors is based on judgment and experience, including an awareness of the results of interlaboratory comparisons. The implications of such estimates is often that they are the maximum possible systematic errors. In this event the total maximum systematic error is the sum of the errors. It is, however, more likely that these estimates are probabilistic in nature and do not, in fact, represent the worst possible case. The total probable systematic errors are summed in the same manner as random errors, that is, the square root of the sum of squares. In the following discussion the latter approach is taken. However, the user must decide if the bias estimates are worst cases or probabilistic in nature, and sum them accordingly.

9.2.5.2 *Random Error, δ_r* , is that component of error that varies both in sign and magnitude during the runs that constitute a successful test. For simplicity, it is assumed that the variations are normally distributed and conventional statistical techniques are applicable. An estimate of random error components can be obtained by repeat measurements of each variable.

9.2.5.3 It is important to distinguish between random and systematic errors for the following reason. The results reported in the test method are mean values derived from more than a single run. The uncertainties reported generally apply to these mean values. The uncertainty of a mean value due to the random error component decreases approximately as $1/\sqrt{n}$ where n is the number of repeat runs. In contrast to this, the uncertainty of the mean value due to the systematic error component does not decrease with repeat runs. Thus, it is recommended that the error components be treated separately. The total uncertainty is expressed by reporting both components separately.

9.3 In the following sections, the error components of each reported variable are discussed. The total random or systematic uncertainty for each variable is taken to be the square root of the sum of squares.

9.4 *Heat Flow, Q* —The objective of the test method is to establish and measure uniaxial heat flow through the metered region of the specimen. Any deviation from this objective represents error in the reported heat flow. The following sources of error should be considered:

9.4.1 *Edge Heat Loss, $\delta_s Q_e$* , is a systematic error insofar as the conditions surrounding the plate-specimen stack remain constant throughout the test procedure. Although tests have

been reported that shed some light on the magnitude of this error, the results generally are not proven to the point where corrections based on these results are universally accepted (see Refs (1), (4), (6), (7), (18), (19), (20), (21), and (22)). However, the results are considered sufficiently valid for the basis of defining the maximum specimen thickness. The optimum environmental temperature to minimize this error is a small fraction of ΔT above the mean test temperature. To determine the sensitivity of this error to test conditions, the user should determine the heat flux as a function of secondary guard temperature. This dependence may change appreciably with specimen and apparatus characteristics and, therefore, should be done under typical test conditions.

9.4.2 *Gap Heat Loss*, considered to be composed of both systematic, $\delta_s Q_g$, and random, $\delta_r Q_g$, components. The systematic component is, in part, due to the fact that there are a finite number of locations along the gap at which the unbalance is measured. Improper position of the sensors will lead to systematic error. Spurious emfs within the circuitry will result in a systematic unbalance. The random component is due to short-term control fluctuations. After estimating the probable unbalance across the gap in terms of temperature (or sensor voltage) one needs to determine the effect of this unbalance on the measured heat flow through the metered area. This can be done by measuring the dependence of metered area power on intentionally introduced gap unbalance. The unbalance introduced should be large enough to yield an easily measured change in Q , but small enough to remain in the region where the dependence of Q upon unbalance is approximately linear.

9.4.2.1 It has been found that (see Refs (3), (15), and (16)) the gap heat loss, δQ_g is linearly dependent on temperature unbalance, ΔT_g , that is, $\delta Q_g = B\Delta T_g$. The proportionality constant, B , is dependent on the wires crossing the gap (number, size, and type), the gap fill material (gas, insulation), the emittance of the gap surfaces and the material in the vicinity of the gap between the hot and cold plates. A reasonable approximation of this heat flow can be calculated from this information. It is recommended that this be done for confirmation of the value measured by the procedure described in the previous paragraph.

9.4.3 *Effect of Drift of the Guarded Heater*—A quasi-heat loss exists due to the changing heat content of the guarded heater as its temperature changes. Typical plates have a relatively high heat capacity and even for small drift rates can produce significant errors in measured heat flow. If the drift is monotonic, the error is systematic, $\delta_s Q_d$; if not, the error is exhibited as random error, $\delta_r Q_d$. Normally, the experiment is conducted so that there is no observable drift. Under this circumstance, the possible drift is determined by the detectability or control limit, dT/dt , of the system. One can compute the magnitude of this error, δQ_d in watts, from a knowledge of the maximum possible dT/dt and the specific heats and masses of the various components of the metered section of the plate as follows:

$$\delta Q_d = dT/dt \sum C_i M_i$$

where:

C_i = the specific heat of the i th component of the plate, J/kg·K,

M_i = the mass of the i th component, kg, and

dT/dt = potential or actual drift rate of the plate, K/s.

The specimen heat capacity also contributes to the drift error, but for low-density insulations the heat capacity of the specimen is small compared to the plate. This error also can be determined by measuring the dependence of drift rate on measured heater power. Comparison of the calculated and measured results is advised to increase confidence in the reported result.

9.4.4 *Power Determination Error*, composed of both systematic, $\delta_s Q_p$, and random, $\delta_r Q_p$, components. With high quality instrumentation these errors can be reduced to an insignificant level. The manufacturers' specifications on bias and precision will normally suffice to define these errors.

9.5 *Temperature and Temperature Difference*:

9.5.1 Temperature error is composed of systematic, $\delta_s T$ and random, $\delta_r T$, components. In addition, these errors are further subdivided according to the source of the error:

9.5.1.1 *Calibration Error*, $\delta_s T_c$, is entirely systematic as long as the same calibration is used. It is, however, not necessarily the same for each temperature sensor. In the case of thermocouples, calibration is frequently performed for each spool of wire, not for each piece of wire from that spool. Therefore, systematic differences can occur as one progresses through the spool. The calibration is frequently represented by an equation which approximates the experimental calibration data taken at selected temperatures. If a digital read-out device is used that yields temperature directly, the calibration formulation is built into the device and the same basis for error exists.

9.5.1.2 *Instrumentation Measurement Error*, δT_m , occurs when the sensor output is measured. This error contains both systematic and random components. Each component should be estimated from equipment manufacturer's specifications and from estimated spurious circuit effects. In addition, temperature errors are introduced by long- and short-term control fluctuations. A helpful procedure to assess the magnitude of these errors is as follows. Place the guard heating unit in thermal contact with the adjacent cold plate (insert high conductance plates in place of the specimens if the plates cannot be placed physically together). Adjust the cold plates to the desired temperature; control this temperature until steady-state is reached. The metered area heater should be off. Periodically read the isothermal surface temperatures to detect systematic differences and random variations over an extended time.

9.5.1.3 *Sensor Positioning*, a potentially significant source of error in temperature measurement is caused by improper positioning of the sensor or the disturbance caused by the temperature sensor itself. It is intended that the average temperature of each specimen surface be measured. If the sensor is mounted in the plate surface, thermal contact resistance between the plate and specimen is a source of error. If the sensor is mounted in the specimen surface

sensor separation (specimen thickness) is a source of error. If the specimen is inhomogeneous across the metered area, surface temperature variations exist and the indicated temperature will depend on its location on the surface. If heatflows along the sensor leads from the external environment, the measured temperature will be in error because of the presence of the sensor. For a single test on a given specimen, this source of error, $\delta_s T_p$, is systematic. A performance check that is helpful to determine the potential temperature error due to temperature nonuniformity is as follows: Assemble a multijunction thermocouple and place it between the specimen and plate in question. Establish steady-state at the desired test condition. Determine the variation in temperature across the plate from the multijunction thermocouple outputs.

9.5.1.4 A helpful technique to estimate interface temperature errors is to mount sensors both within the plate and within the specimen surface. Then perform a test and calculate the difference between the two sets of data.

9.5.2 Temperature difference error is also composed of systematic, $\delta_s \Delta T$, and random components, $\delta_r \Delta T$. Care must be exercised in estimating these components compared to the error components for temperature itself. The results can depend strongly on whether a differential measurement or two absolute measurements are performed. Because ΔT is frequently small, large percentage errors can occur if care is not observed. For example, a 1-K error at 300 K in the surface temperature measurement results in a error of 1 K in the mean temperature, which corresponds to about 0.2 % error in thermal conductance for typical insulations. However, this same error in $\Delta T = 25$ K corresponds to a 4 % error in ΔT and in thermal conductance. The ad hoc experiment described in 9.5.1.3 is recommended to help form estimates of these error components.

9.6 *Specimen Thickness Error, $\delta_s L$, and meter area error, $\delta_s A$, are both systematic errors. The specimen thickness error is determined by the ability to measure the plate spacing (including variations of this thickness over the metered region) or, in the case of rigid specimens, the specimen thickness and the changes due to thermal expansion. The effect of bowing or warping at operating temperatures should be given attention. At relatively large thicknesses (above 5 cm) this error can be maintained below 0.5 %. At small thicknesses (below 0.5 cm) this error may become a dominating factor in the overall accuracy. The meter area error is usually small except for the assumption about what proportion of the gap area to include. This error is difficult to estimate for very thin specimens or when a discontinuity in*

the specimen occurs at the gap. The specimen thickness error will contain a random component, $\delta_r L$, due to assembly and disassembly.

9.7 *Thermal Conductance or Thermal Resistance*—The relative uncertainty in thermal conductance, C , caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\delta C/C)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2$$

where $\delta Q/Q$ and $\delta \Delta T/\Delta T$ are the total relative uncertainties of heat flux and temperature difference, respectively. The same equation applies to thermal resistance. Included in the total relative uncertainties are those due to the measurement as well as those discussed in Practice C 1045.

9.8 *Thermal Conductivity or Thermal Resistivity*—The relative uncertainty in thermal conductivity, λ , caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\delta \lambda/\lambda)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2 + (\delta A/A)^2 + (\delta L/L)^2$$

where $\delta A/A$ and $\delta L/L$ are the total relative uncertainties of area and thickness, respectively. Again, the above total relative uncertainties include not only the measurement uncertainty, but also the effect of material variability and deviations from the definitions as discussed in Practice C 1045. In addition, it should be noted that the temperature to which each measured property is assigned also contains a measurement error that effects the uncertainty of the final result. The effect of this error increases as the temperature dependence of the measured property increases.

9.9 It is recommended that a confirmation of these calculated uncertainties be conducted periodically by measuring specimens from established standard reference materials or calibrated transfer specimens. For further information on this see Refs (23), (24), (25), (26), (27), (28), and (29).

10. Report

10.1 The report of the results of each test shall include identification of the specimen, the environmental test condition, salient features of the apparatus, and measured results along with their estimated systematic and random uncertainties. The measured results shall be the average values as obtained from the test. If unusual circumstances exist that prevent compliance with the method, they shall be described. The results shall be reported in a form similar to that shown in Fig. 4. Narrative details requiring further space may be attached on a separate sheet of the report. When possible, a description of the physical characteristics of the specimen are helpful to the data analyst. Test results shall be reported in both conventional British thermal units and SI units.

Date: _____ Test Number: _____
 Operator: _____ Duration of Test: _____

Specimen Identification: Product name, manufacturers description
 Specimen Characteristics: Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optimal)
 Specimen Conditioning: Temperature, time, humidity
 Specimen Dimensions and Mass: Before and after conditioning and after measurement

Apparatus Description: Size, shape, and orientation of plates
 Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures

Experimental Results

| Variable | Measured Value | Uncertainty | |
|-----------------------------------|----------------|-------------|--------|
| | | Systematic | Random |
| O, W | | | |
| TH, K | | | |
| TC, K | | | |
| T̄, K | | | |
| ΔT, K | | | |
| A, m ² | | | |
| L, m | | | |
| Fill gas pressure, P _g | | | |
| Other | | | |

Derived thermal transmission properties including applicable range of conditions shall be determined in conformance to Practice C 1045.

FIG. 4 Example Report Form

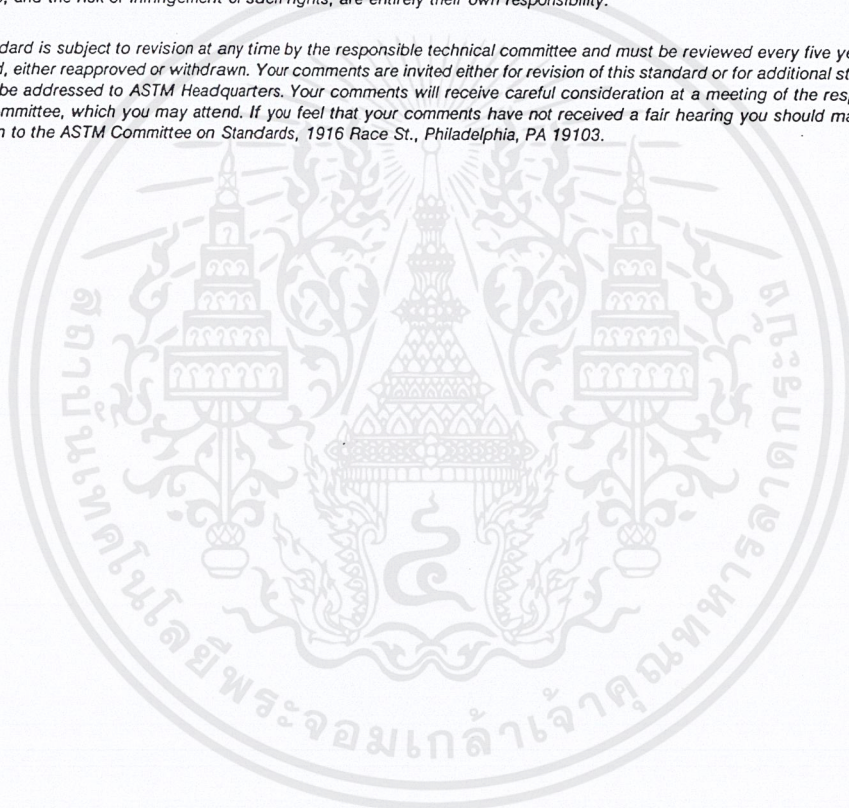
REFERENCES

- Bankvall, C. G., "Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 34-48.
- Brendeng, E. and Frivik, P. E., "New Development in Design of Equipment for Measuring Thermal Conductivity and Heat Flow," *ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 147-166.
- Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "A Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measuring Effective Thermal Conductivity of Insulations Between 80 K and 360 K," *NBSIR 81-1657*, 1982, 49 pp.
- Pratt, A. W., Chapter 6: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials," in *Thermal Conductivity*, Vol 1, R. P. Tye, Ed., Academic Press, 1969, pp. 301-405.
- De Ponte, F. and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 97-117.
- Woodside, W. and Wilson, A. G., "Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1956, pp. 32-48.
- Woodside, W., "Analysis of Errors Due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1957, pp. 49-64.
- Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol 28, 1956, pp. 1933-1937.
- Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM STP 470B*, 1981, 285 pp.
- Sparks, L. L., Powell, R. L., and Hall, W. J., *Cryogenic Thermocouple Tables, NBS Report 9712*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1968, pp. 21.
- Bertasi, M., Bigolaro, G., and De Ponte, F., "Fibrous Insulating Materials as Standard Reference Materials at Low Temperatures," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 30-49.
- Shirtliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 13-33.
- Bomberg, M. and Solvason, K. R., "Precision and Accuracy of Guarded Hot Plate Method," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 393-410.
- Siu, M. C. I., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed Heat Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 413-418.
- Siu, M. C. I. and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 52(11), 1981, pp. 1709-1716.
- Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program," *NBSIR 84-2890*, 1984, 17 pp.
- Donaldson, I. G., "A Theory for the Square Guarded Hot Plate—A Solution of the Heat Conduction Equation for a Two Layer System," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol XIX, 1961, pp. 205-219.
- Donaldson, I. G., "Computer Errors for a Square Guarded Hot Plate for the Measurement of Thermal Conductivities of Insulating Materials," *British Journal of Applied Physics*, Vol 13, 1962, pp. 598-602.
- Pratt, A. W., "Analysis of Error Due to Edge Heat Loss in Measuring Thermal Conductivity by the Hot Plate Method," *Journal of Scientific Instruments*, Vol 39, 1962, pp. 63-68.
- Somers, E. V. and Cybers, J. A., "Analysis of Errors in Measuring Thermal Conductivity of Insulating Materials," *Review of Scientific Instruments*, Vol 22, 1951, pp. 583-586.
- Troussart, L. R., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 4, 1981, pp. 225-254.
- Pelanne, C. M., "The Development of Low Density Glass-Fiber Insulation as Thermal Transmission Reference Standards," *Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 763-776.

- (24) Rennex, B. G., Jones, R. R., and Ober, D. G., "Development of Calibrated Transfer Specimens of Thick, Low-Density Insulations," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 419-426.
- (25) Shirtliffe, C. J., "Effect of Thickness on the Thermal Properties of Thick Specimens of Low-Density Thermal Insulation," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 36-50.
- (26) Siu, M. C. I., "Fibrous Glass Board as Standard Reference Material for Thermal Resistance Measurement Systems," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 343-360.
- (27) Smith, D. R. and Hust, J. G., "Effective Thermal Conductivity of Glass-Fiber Board and Blanket Standard Reference Materials," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 483-496.
- (28) Smith, D. R. and Hust, J. G., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of a Glass Fiberboard Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 7, July 1981, pp. 408-410.
- (29) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of Glass Fibreblanket Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 8, August 1981, pp. 460-462.

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 Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement¹

This standard is issued under the fixed designation D 792; 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.

These test methods have been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace method 5011 and 5012 of Federal Test Method Standard 406 and 14011 and 14021 of FTMS 601, and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 These test methods describe the determination of the specific gravity (relative density) and density of solid plastics in forms such as sheets, rods, tubes, or molded items.

1.2 Two test methods are described:

1.2.1 *Test Method A*—For testing solid plastics in water, and

1.2.2 *Test Method B*—For testing solid plastics in liquids other than water.

NOTE 1—Alternatively, Test Method D 1505¹ may be applied to many such forms, as well as to films and sheeting.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

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 891 Test Methods for Specific Gravity of Liquid Industrial Chemicals³

D 1505 Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique⁴

D 1622 Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics⁵

D 1898 Practice for Sampling of Plastics⁵

E 1 Specification for ASTM Thermometers⁶

E 12 Terminology Relating to Density and Specific Gravity of Solids, Liquids, and Gases⁷

E 380 Practice for Use of the International System of Units (SI)⁸

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.70 on Analytical Methods (Section D20.70.01).

Current edition approved July 15, 1991. Published September 1991. Originally published as D 792 - 44. Last previous edition D 792 - 86.

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

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

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 14.03.

⁷ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

⁸ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁸

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *specific gravity (relative density)*—the ratio of the mass in air of a unit volume of the impermeable portion of the material at 23°C to the mass in air of equal density of an equal volume of gas-free distilled water at the same temperature. The form of expression shall be:

$$\text{Specific gravity (relative density) } 23/23^{\circ}\text{C} \\ (\text{or sp gr } 23/23^{\circ}\text{C})$$

NOTE 2—This definition is essentially equivalent to the definition for apparent specific gravity and apparent density in Terminology E 12, because the small percentage difference introduced by not correcting for the buoyancy of air is insignificant for most purposes.

3.1.2 *density*—the mass in kilograms per cubic metre of impermeable portion of the material at 23°C. The form of expression shall be:

$$D^{23}, \text{ kg/m}^3 \text{ (Notes 2, 3, 4)}$$

NOTE 3—The SI unit of density, as defined in Practice E 380 is kg/m³. To convert density in g/cm³ to density in kg/m³, multiply by 1000.

NOTE 4—Specific gravity 23/23°C can be converted to density 23°C, mg/m³, by use of the following equation:

$$D^{23} \text{ } ^{\circ}\text{C, kg/m}^3 = \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} \times 997.6$$

4. Summary of Test Methods

4.1 Determine the mass of a specimen of the solid plastic in air. It is then immersed in a liquid, its apparent mass upon immersion is determined, and its specific gravity (relative density) calculated.

5. Significance and Use

5.1 The specific gravity or density of a solid is a property that can be measured conveniently to identify a material, to follow physical changes in a sample, to indicate degree of uniformity among different sampling units or specimens, or to indicate the average density of a large item.

5.2 Changes in density of a single specimen may be due to changes in crystallinity, loss of plasticizer, absorption of solvent, or to other causes. Portions of a sample may differ in density because of difference in crystallinity, thermal history, porosity, and composition (types or proportions of resin, plasticizer, pigment, or filler).

NOTE 5—Reference is made to Test Method D 1622.

5.3 Density is useful for calculating strength-weight and cost-weight ratios.

6. Sampling

6.1 The sampling units used for the determination of specific gravity (relative density) shall be representative of the quantity of product for which the data are required, in accordance with Practice D 1898.

6.1.1 If it is known or suspected that the sample consists of two or more layers or sections having different specific gravities, either complete finished parts or complete cross sections of the parts or shapes shall be used as the specimens, or separate specimens shall be taken and tested from each layer. The specific gravity (relative density) of the total part cannot be obtained by adding the specific gravity of the layers, unless relative percentages of the layers are taken into account.

7. Conditioning

7.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 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 required. In cases of disagreement, the tolerances shall be 1°C and $\pm 2\%$ relative humidity.

7.2 *Test Conditions*—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the test methods or in this specification. In cases of disagreement, the tolerances shall be 1°C and $\pm 2\%$ relative humidity.

TEST METHOD A FOR TESTING SOLID PLASTICS IN WATER (SPECIMENS 1 TO 50 g)

8. Scope

8.1 This test method involves weighing a one-piece specimen of 1 to 50 g in water, using a sinker with plastics that are lighter than water. This test method is suitable for plastics that are wet by, but otherwise not affected by water.

9. Apparatus

9.1 *Analytical Balance*—A balance with a precision within 0.1 mg, accuracy within 0.05 % relative (that is, 0.05 % of the mass of the specimen in air), and equipped with a stationary support for the immersion vessel above the balance pan ("pan straddle").

NOTE 6—Assurance that the balance meets the performance requirements should be provided by frequent checks on adjustments of zero point and sensitivity and by periodic calibration for absolute accuracy, using standard masses.

9.2 *Wire*—A corrosion-resistant wire for suspending the specimen.

9.3 *Sinker*—A sinker for use with specimens of plastics that have specific gravities less than 1.000. The sinker shall: (1) be corrosion-resistant; (2) have a specific gravity of not less than 7.0; (3) have smooth surfaces and a regular shape; and (4) be slightly heavier than necessary to sink the specimen. The sinker should have an opening to facilitate attachment to the specimen and wire.

9.4 *Immersion Vessel*—A beaker or other wide-mouthed vessel for holding the water and immersed specimen.

9.5 *Thermometer*—A thermometer with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$ is required if the test is not performed in the standard laboratory atmosphere of Practice D 618, (refer to 17.4).

10. Materials

10.1 *Water*—The water shall be substantially air-free, distilled, or demineralized water.

NOTE 7—Water may be rendered substantially air-free by boiling and cooling or by shaking under vacuum in a heavy-walled vacuum flask. (Precaution: Use gloves and shielding.) If the water does not wet the specimen, a few drops of a wetting agent shall be added. If this solution does not wet the specimen, Method B shall be used.

11. Test Specimens

11.1 The test specimen shall be a single piece of the material under test of any size and shape that can conveniently be prepared and tested, provided that its volume shall be not less than 1 cm^3 and its surface and edges shall be made smooth. The thickness of the specimen should be at least 1 mm for each 1 g of weight. A specimen weighing 1 to 5 g usually will be found convenient, but specimens up to approximately 50 g may be used (Note 8). Care should be taken in cutting specimens to avoid changes in density resulting from compressive stresses or frictional heating.

NOTE 8—Specifications for certain plastics require a particular method of specimen preparation and should be consulted if applicable.

11.2 The specimen shall be free from oil, grease, and other foreign matter.

12. Procedure

12.1 Weigh the specimen in air to the nearest 0.1 mg for specimens of mass 1 to 10 g or to the nearest mg for specimens of mass more than 10 to 50 g.

12.2 Attach to the balance a piece of fine wire sufficiently long to reach from the hook above the pan to the support for the immersion vessel. Attach the specimen to the wire such that it is suspended about 25 mm above the vessel support.

NOTE 9—The specimen may be weighed in air after hanging from the wire. In this case, record the mass of the specimen. $a = (\text{mass of specimen} + \text{wire, in air}) - (\text{mass of wire in air})$.

12.3 Mount the immersion vessel on the support, and completely immerse the suspended specimen (and sinkers, if used) in water (10.1) at a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$. The vessel must not touch wire or specimen. Remove any bubbles adhering to the specimen, wire, or sinker, paying particular attention to holes in the specimen and sinker. Usually these bubbles can be removed by rubbing them with another wire. If the bubbles cannot be removed by this method or if bubbles are continuously formed (as from dissolved gases), the use of vacuum is recommended (Note 11). Determine the mass of the suspended specimen to the required precision (12.1) (Note 10). Record this apparent mass as b (the mass of the specimen, sinker, if used, and the partially immersed wire in liquid). Unless otherwise specified, weigh rapidly in order to minimize absorption of water by the specimen.

NOTE 10—It may be necessary to change the sensitivity; adjustment of the balance to overcome the damping effect of the immersed specimen.

NOTE 11—Some specimens may contain absorbed or dissolved gases, or irregularities which tend to trap air bubbles; any of these may affect the density values obtained. In such cases, the immersed specimen may

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

be subjected to vacuum in a separate vessel until evolution of bubbles has substantially ceased before weighing (see Test Method B). It must also be demonstrated that the use of this technique leads to results of the required degree of precision.

12.4 Weigh the wire (and sinker, if used) in water with immersion to the same depth as used in the previous step (Notes 12 and 13). Record this height as *w* (mass of the wire in liquid).

NOTE 12—It is convenient to mark the level of immersion by means of a shallow notch filed in the wire. The finer the wire, the greater the tolerance which may be permitted in adjusting the level of immersion between weighings. With wire Awg No. 36 or finer, disregard its degrees of immersion and, if no sinker is used, use the mass of the wire in air as *w*.

NOTE 13—If the wire is left attached to the balance arm during a series of determinations, the mass *a* may be determined either with the aid of a tare on the other arm of the balance or as in Note 11. In such cases, care must be taken that the change of mass of the wire (for example, from visible water) between readings does not exceed the desired precision.

12.5 Repeat the procedure for the required number of specimens. Two specimens per sample are recommended. Determine acceptability of number of replicate test specimens by comparing results with precision data given in Tables 1 and 2 of Section 23. Additional specimens may be required to give the desired precision.

13. Calculation

13.1 Calculate the specific gravity of the plastic as follows:

$$\text{Sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} = a/(a + w - b)$$

where:

a = apparent mass of specimen, without wire or sinker, in air,

b = apparent mass of specimen (and of sinker, if used) completely immersed and of the wire partially immersed in liquid, and

w = apparent mass of totally immersed sinker (if used) and of partially immersed wire.

13.2 Calculate the density of the plastic as follows:

$$D^{23^{\circ}\text{C}}, \text{ kg/m}^3 = \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} \times 997.6$$

14. Report

14.1 Report the following information:

14.1.1 Complete identification of the material or product tested, including method of specimen preparation and conditioning,

14.1.2 Average specific gravity (relative density) for all specimens from a sampling unit, reported as sp gr 23/23°C = _____, or average density reported as $D^{23^{\circ}\text{C}} = \text{_____ kg/m}^3$,

14.1.3 A measure of the degree of variation of specific gravity or density within the sampling unit such as the standard deviation and number of determinations on a homogeneous material or the averages plus these measures of

dispersion on different layers or areas of a nonhomogeneous product,

14.1.4 Any evidence of porosity of the material or specimen,

14.1.5 The method of test (Method A of Methods D 792 and

14.1.6 Date of test.

15. Precision and Bias

15.1 See Section 23.

TEST METHOD B FOR TESTING SOLID PLASTICS IN LIQUIDS OTHER THAN WATER (SPECIMENS 1 TO 50 g)

16. Scope

16.1 Test Method B uses a liquid other than water for testing one-piece specimens, 1 to 50 g, of plastics that are affected by water or which are lighter than water.

17. Apparatus

17.1 The apparatus shall include the balance, wire, an immersion vessel of Section 8, and, optionally, the following:

17.2 *Pycnometer with Thermometer*—A 25-mL specific gravity bottle with thermometer, or

17.3 *Pycnometer*—A pycnometer of the Weld type, preferably with a capacity of about 25 mL and an external cover over the stopper.

17.4 *Thermometer*—A thermometer having not fewer than four divisions per °C over a temperature range of not less than 5°C or 10°F above and below the standard temperature, and having an ice point for calibration. The thermometer short enough to be handled inside the balance case will be found convenient. ASTM Thermometer 23 (see Specification E 1) and Anschutz-type thermometers have been found satisfactory for this purpose.

17.5 *Constant-Temperature Bath*—An appropriate constant-temperature bath adjusted to maintain a temperature of 23 ± 0.1°C.

18. Materials

18.1 *Immersion Liquid*—The liquid used shall not dissolve, swell, or otherwise affect the specimen, but should wet it and should have a specific gravity less than that of the specimen. In addition, the immersion liquid should be nonhygroscopic, have a low vapor pressure, a low viscosity, and a high flash point, and should leave little or no waxy or tarry residue on evaporation. A narrow cut distilled from kerosine meets these requirements for many plastics. The specific gravity 23/23°C of the immersion liquid shall be determined shortly before and after each use in this method to a precision of at least 0.1 % relative, unless it has been

TABLE 1 Test Method A Specific Gravity Tested in Water

| Material | Mean | <i>S_r</i> | <i>S_R</i> | <i>I_r</i> | <i>I_R</i> |
|----------------------------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Polypropylene | 0.9007 | 0.00196 | 0.00297 | 0.00555 | 0.00841 |
| Cellulose Acetate Butyrate | 1.1973 | 0.00232 | 0.00304 | 0.00657 | 0.00860 |
| Polyphenylene Sulfide | 1.1708 | 0.00540 | 0.00738 | 0.01528 | 0.02089 |
| Thermoset | 1.3136 | 0.00271 | 0.00313 | 0.00767 | 0.02171 |
| Polyvinyl Chloride | 1.3396 | 0.00243 | 0.00615 | 0.00688 | 0.01947 |

TABLE 2 Test Method B Specific Gravity Tested in Liquids Other Than Water

| Material | Mean | S_r | S_R | I_r | I_R |
|---------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Polypropylene | 0.9023 | 0.00139 | 0.00239 | 0.00393 | 0.00676 |
| LDPE | 0.9215 | 0.00109 | 0.00195 | 0.00308 | 0.00552 |
| HDPE | 0.9678 | 0.00126 | 0.00189 | 0.00356 | 0.01007 |
| Thermoset | 1.3130 | 0.00160 | 0.00217 | 0.00453 | 0.01282 |

established experimentally in the particular application that a lesser frequency of determination can be used to assure the desired precision.

NOTE 14—For the determination of the specific gravity of the liquid, the use of a standard plummet of known volume (Note 15) or of Method A, C, or D of Test Methods D 891, using the modifications required to give specific gravity 23/23°C instead of specific gravity 60/60°F, is recommended. One suggested procedure is the following:

If a constant-temperature water bath is not available, determine the mass of the clean, dry pycnometer with thermometer to the nearest 0.1 mg on an analytical balance. Fill the pycnometer with water (10.1 cooler than 23°C. Insert the thermometer-stopper, causing excess water to be expelled through the side arm. Permit the filled bottle to warm in air until the thermometer reads 23.0°C. Remove the drop of water at the tip of the side arm with a bit of filter paper, taking care not to draw any liquid from within the capillary, place the cap over the side arm, wipe the outside carefully, and determine the mass of the filled bottle again to the nearest 0.2 mg. Empty the pycnometer, dry, and fill and determine the mass with the other liquid in the same manner as was done with the water. Calculate the specific gravity 23/23°C of the liquid, d , as follows:

$$d = (b - e)/(w - e)$$

where:

- e = apparent mass of empty pycnometer,
- w = apparent mass of pycnometer filled with water at 23.0°C, and
- b = apparent mass of pycnometer filled with liquid at 23.0°C.

If a constant-temperature water bath is available, a pycnometer without a thermometer may be used (compare 30.2).

NOTE 15—One standard object which has been found satisfactory for this purpose is the Reimann Thermometer Plummet. These are normally supplied calibrated for measurements at temperatures other than 23/23°C, so that recalibration is necessary for the purposes of these methods.

19. Test Specimens

19.1 See Section 11.

20. Procedure

20.1 The procedure shall be similar to Section 12, except for the choice of immersion liquid, and the temperature during the immersed weighing (12.3) shall be $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

21. Calculation

21.1 The calculations shall be similar to Section 13, except that d , the specific gravity 23/23°C of the liquid, shall be placed in the numerator:

$$\text{Sp gr } 23/23^\circ\text{C} = (a \times d)/(a + w - b)$$

22. Report

22.1 See Section 14.

23. Precision and Bias⁹

23.1 Tables 1 and 2 are based on round robins conducted in 1985 involving five materials tested by six laboratories for Test Method A. Four materials were tested with Test Method B by six laboratories. Each test result was based on two individual determinations. Each laboratory obtained four test results for each material.

23.2 In Tables 1 and 2, for the materials indicated, and for mean values that are derived from testing two specimens:

23.2.1 S_r is the within-laboratory standard deviation of the mean and $I_r = 2.83 S_r$. (See 23.2.3 for application of I_r .)

23.2.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the mean, and $I_R = 2.83 S_R$. (See 23.2.4 for application of I_R .)

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

23.2.4 *Reproducibility*—In comparing two mean values for the same material obtained by different operators using different equipment on different days, the means 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.)

23.2.5 The judgments per 23.2.3 and 23.2.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

23.2.6 Other materials may give somewhat different results.

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

24. Keywords

24.1 density; relative density; specific gravity

⁹ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D 20 - 1133.

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.