



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

แผ่นมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล
Roofing sheets from recycled materials

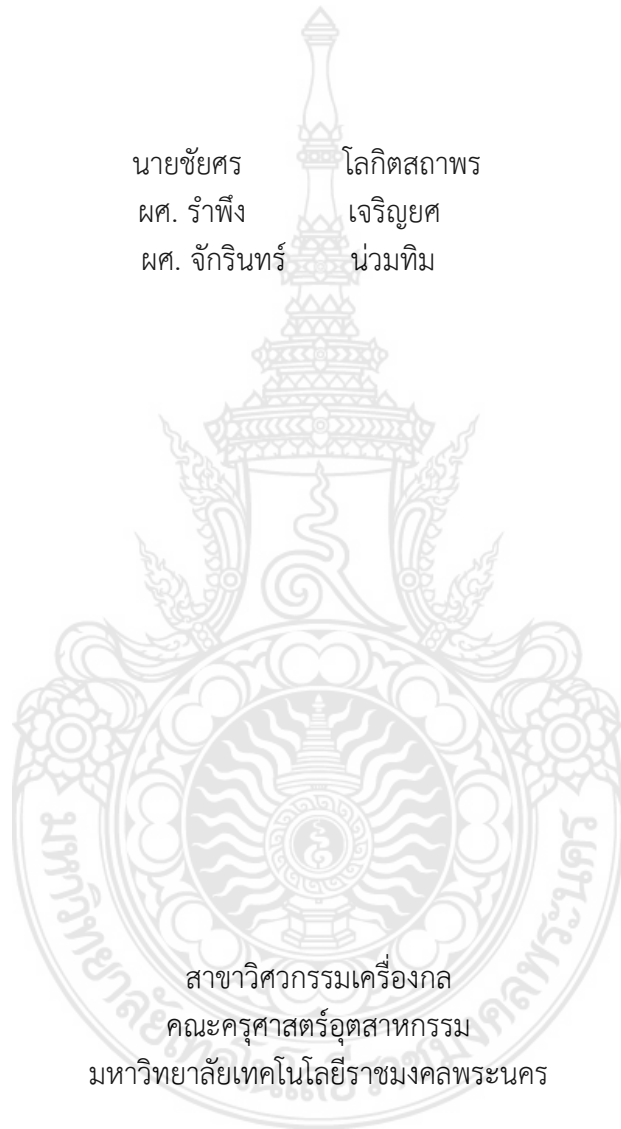
คณะผู้วิจัย

นายชัยศร	โลกิตสถาพร
ผศ. รำพึง	เจริญยศ
ผศ. จักรินทร์	น่วมทิม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี 2560
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

แผ่นมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล

นายชัยศร โลกิตสถาพร
ผศ. รำพึง เจริญยศ
ผศ. จักรินทร์ น่วมทิม



สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Roofing sheets from recycled materials

Mr. Chaisorn Lokitsathaporn
Asst. Prof. Rampueng Jaroenyos
Asst. Prof. Jakarin Naumtim

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Education
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Academic Year 2017



บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุรีไซเคิลที่ใช้ทำเป็นแผ่นมุงหลังคา ที่ได้จากการแยกเยื่อกระดาษออกจากกล่องเครื่องดื่ม UHT เพื่อให้ได้อลูมิเนียมฟอยล์ที่ผสมกับพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้และเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดจำนวนกล่องเครื่องดื่ม UHT ที่เหลือใช้มาทำเป็นแผ่นมุงหลังคา

การทดลองใช้อลูมิเนียมฟอยล์ 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดหยาบ ปานกลาง และละเอียด ใส่ในแม่แบบแล้วนำไปอบร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา.....นาที่ และทำการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่น ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยใช้แรงอัด 6, 8 และ 10 bar จากนั้นตัดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพตามมาตรฐานในการทดสอบได้แก่ การทดสอบการต้านแรงดัดโค้ง การต้านทานแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก ความแข็ง การดูดซึมน้ำ การพองตัว ความหนาแน่น และการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน เปรียบเทียบสมบัติต่างๆทั้งทางกลและทางกายภาพของวัสดุ ที่มีขนาดอลูมิเนียมฟอยล์และแรงอัดในการขึ้นรูปที่ต่างกัน เพื่อนำวัสดุผสมที่มีสมบัติดีที่สุดไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แผ่นมุงหลังคา

จากการทดลองพบว่าสมบัติวัสดุผสม จากกล่องเครื่องดื่ม UHT รีไซเคิล ที่ใช้ทำแผ่นมุงหลังคาควรทำจากวัสดุผสมที่มีขนาดอลูมิเนียมฟอยล์หยาบ ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 10 bar ซึ่งมีสมบัติการต้านแรงดัดโค้ง 18.23 MPa การต้านทานแรงดึง 10.66 MPa การทนต่อแรงกระแทก 110.99 J/m² ความแข็ง 52.40 Shore-D การดูดซึมน้ำ 0.62 % การพองตัว 0.70 % ความหนาแน่น 1.086 g/m³ การต้านทานความร้อน 0.031 m².K/W และ การนำความร้อน 0.219 W/mK ซึ่งเป็นสมบัติทางกลที่ดีที่สุด เนื่องจากวัสดุผสมที่มีอลูมิเนียมฟอยล์ขนาดใหญ่และใช้แรงอัดขึ้นรูปสูง จะมีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุผสมที่มีอลูมิเนียมฟอยล์ขนาดเล็กเพราะเนื้อวัสดุสามารถยืดหยุ่นได้และมีแรงอัดขึ้นรูปสูงทำให้มีการเกาะยึดของชิ้นส่วนผสมหนาแน่นมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ยูเอชที อลูมิเนียมฟอยล์ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ การอัดขึ้นรูป

Abstract

The purpose of this project is to study the mechanical and physical properties of recycled roofing materials. The pulp extracted from the UHT beverage boxes to get aluminum foil mixed with low density polyethylene. This can be used engineering and is an option to reduce the amount of UHT boxes left over to roofing sheets.

In experiment 3 aluminum foil, medium size and fine, then hot and extruded with 6,8 and 10 bar compression, then cut into test pieces. To test mechanical and physical properties in accordance with the test standards: Torsion Testing Tensile strength Impact resistance Heat resistance, water absorption, and density testing. Compare the mechanical and physical properties of the material; different sizes of aluminum foil and compressive strength. To bring the best materials to the product.

From the tests, it was found that the properties of recycled composite materials From the box UHT beetroot This is made of coarse aluminum foil. 18.23 MPa bending strength, 10.66 MPa tensile strength, 110.987 J / m² impact resistance, 52.40 Shore-D Hardness, 0.62 % Water Absorption, 0.70 % Thickness Swelling, 1.086 g/m³ Density, 0.031 m².K/W Thermal Resistance and 0.291 W/mK Thermal Conductivity is the best mechanical properties. Due to the large aluminum foil, it can be used for high strength. Which is higher than the aluminum foil of a smaller size.



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ 1	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 นิยามศัพท์สำคัญ	4
2.2 แนวคิด	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.4 ทฤษฎีที่สำคัญ	7
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	28
3.1 การวางแผนงาน	28
3.2 การเตรียมการ	31
3.3 การออกแบบการทดลอง	34
3.4 การดำเนินงาน	36
3.5 การผลิตวัสดุคุมงหลังคา	49
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	52
4.1 การประเมินผลการทดสอบการตัดโค้ง	52
4.2 การประเมินผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง	53
4.3 การประเมินผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก	54
4.4 การประเมินผลการทดสอบความแข็ง	55
4.5 การประเมินผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การประเมินผลการทดสอบการพองตัว	57
4.7 การประเมินผลการทดสอบความหนาแน่น	58
4.8 การประเมินผลการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผล	63
5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ	63
5.3 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก	67
- ผลการทดสอบการตัดโค้ง	68
- ผลการทดสอบแรงดึง	69
- ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก	71
- ผลการทดสอบความแข็ง	72
- ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ	74
- ผลการทดสอบการพองตัว	76
- ผลการทดสอบความหนาแน่น	78
- ผลทดสอบการต้านทานความร้อน	80
- ผลทดสอบการนำความร้อน	81
- สรุปผลการทดสอบวัสดุ	82
ภาคผนวก ข	83
มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	84
การทดสอบการนำความร้อนและการถ่ายเทความร้อน	112
ภาคผนวก ค	115
ขั้นตอนการผลิตวัสดุผสมหลังคา	116

สารบัญรูป

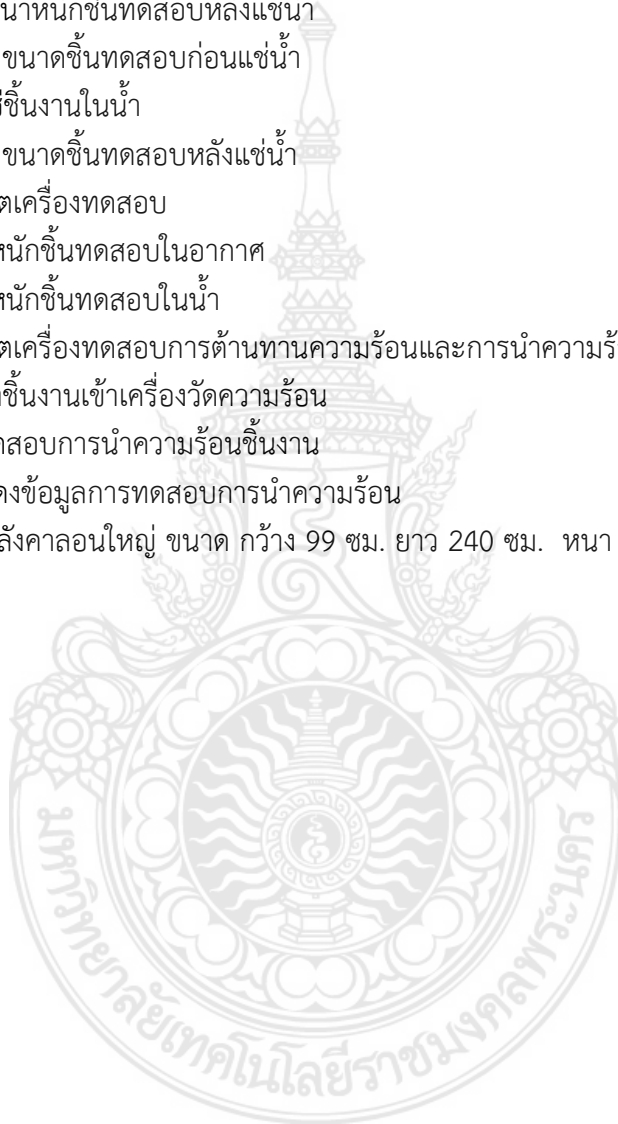
รูปที่	หน้า
2.1	9
2.2	9
2.3	11
2.4	13
2.5	13
2.6	14
2.7	15
2.8	16
2.9	16
2.10	17
2.11	18
2.12	19
2.13	19
2.14	20
2.15	20
2.16	22
2.17	22
2.18	23
2.19	25
2.20	27
3.1	31
3.2	32
3.3	32
3.4	33
3.5	33

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงกระแทก	34
3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง	34
3.8 เครื่องวัดความหนาแน่น	34
3.9 เครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน	35
3.10 การนำกล่องนมที่ทำความสะอาด มาแช่น้ำ	37
3.11 การปั่นเยื่อกระดาษออกจากกล่องนม	37
3.12 อลูมิเนียมฟอยล์ที่ได้จากการปั่นแยกเยื่อกระดาษ	38
3.13 การบดย่อยอลูมิเนียมฟอยล์ที่ตากจนแห้ง	38
3.14 ชั้นอลูมิเนียมฟอยล์	38
3.15 ขนาดชั้นอลูมิเนียมฟอยล์ที่ใช้ทดลอง	38
3.16 แม่แบบอัดชิ้นงาน	39
3.17 การอบอลูมิเนียมฟอยล์ในเตาอบ	39
3.18 การอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	39
3.19 แผ่นวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิลจากการอัดขึ้นรูป	40
3.20 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดัด	41
3.21 การดัดชิ้นงาน	41
3.22 การดัดชิ้นงานชิ้นงานจนแตกหัก	42
3.23 ชิ้นงานหลังการทดสอบการดัดโค้ง	42
3.24 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง	42
3.25 การดึงชิ้นงานทดสอบ	43
3.26 ชิ้นงานทดสอบขาดขณะทดสอบ	43
3.27 ชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง	43
3.28 การบากชิ้นงานทดสอบ	44
3.29 ชิ้นงานที่บากเรียบร้อยแล้ว	44
3.30 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงกระแทก	44
3.31 ชิ้นงานหลังจากการตีทดสอบ	44

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.32 การจับชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบความแข็ง	45
3.33 การกดทดสอบความแข็งชิ้นงาน	45
3.34 การชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ	46
3.35 การแช่ชิ้นงานในน้ำ	46
3.36 การชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ	46
3.37 การวัดขนาดชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ	47
3.38 การแช่ชิ้นงานในน้ำ	47
3.39 การวัดขนาดชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ	47
3.40 การเซ็ทเครื่องทดสอบ	48
3.41 ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบในอากาศ	48
3.42 ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบในน้ำ	48
3.43 การเซ็ทเครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน	49
3.44 การนำชิ้นงานเข้าเครื่องวัดความร้อน	49
3.45 การทดสอบการนำความร้อนชิ้นงาน	50
3.46 จอแสดงข้อมูลการทดสอบการนำความร้อน	50
3.47 แผ่นหลังคาลอนใหญ่ ขนาด กว้าง 99 ซม. ยาว 240 ซม. หนา 5 ซม.	51



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงวิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ	21
2.2 การทดสอบความแข็ง	23
4.1 ผลการทดสอบการดัดโค้ง	53
4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง	53
4.3 ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก	54
4.4 ผลการทดสอบความแข็ง	55
4.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ	57
4.6 ผลการทดสอบการพองตัว	58
4.7 ผลการทดสอบความหนาแน่น	59
4.8 ผลการทดสอบการต้านทานความร้อน	60
4.9 ผลการทดสอบการนำความร้อน	61



บทที่ 1

บทนำ

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุผงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิลในด้านการทดสอบ การต้านแรงบิด การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก การทดสอบการทนต่ออุณหภูมิ และการทดสอบ ความชื้น ซึ่งใช้พลาสติกและอลูมิเนียมพอยล์ มาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้า ข้อมูลและสมบัติของวัสดุเพื่อนำมาหาประสิทธิภาพในการใช้งานและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ด้วยปัจจุบันปัญหาเรื่องขยะมูลฝอยได้กลายเป็นประเด็นสำคัญไม่ว่าจะด้วยภาวะโลกร้อนหรือเป็น ภาระของโลกก็ตาม ทั้งหมดนี้ได้ส่งผลให้ทุกภาคส่วนหันมาให้ความสำคัญในการจัดการขยะทั้งสิ้นไม่ว่า จะเป็นภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคประชาชน จากปริมาณขยะมูลฝอยจากชุมชนทั่วประเทศ 15.98 ล้าน ตัน มีการนำขยะมูลฝอยชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ประมาณ 4.10 ล้านตัน หรือร้อยละ 26 เป็นการคัด แยกขยะและนำกลับคืนสู่การรีไซเคิลประเภท เศษแก้ว กระจาด ขยะพลาสติก เหล็กและอลูมิเนียม

ในประเทศไทยมีการใช้กล่อง UHT บรรจุสินค้าและจำหน่ายรวมปีละ ไม่น่ากว่า 3,000 ล้านกล่อง ดังนั้นการนำกล่อง UHT มาแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการลดขยะและมลพิษ อีกทั้งแผ่น ชิฟท์บอร์ดที่ได้จากการรีไซเคิลกล่อง UHT ยังมีความคงทน แข็งแรง สามารถกันน้ำ และกันปลวกได้ดีอีก ด้วย

1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

- 6.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นวัสดุผสม
- 6.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าวัสดุในงานวิศวกรรมที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มาใช้ประโยชน์ในการสร้างเป็น แผ่นผงหลังคา
- 6.3 เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะมูลฝอยประเภทกล่องเครื่องดื่ม UHT ที่ต้องจัดเก็บและลด ค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำจัดขยะ
- 6.4 เพื่อสร้างเครือข่ายความร่วมมือในการจัดการขยะมูลฝอยและวัสดุรีไซเคิล
- 6.5 เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุรีไซเคิลจากกล่องเครื่องดื่ม UHT เสริมสร้างให้ชุมชนมีอาชีพและมี รายได้เสริม
- 6.6 เพื่อช่วยลดพลังงานจากการใช้วัสดุจากธรรมชาติและรักษาสีสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้เป็นเพียงกล่องเครื่องดื่ม UHT เท่านั้น
- 1.3.2 ในการอัดขึ้นรูปร้อนจะใช้อุณหภูมิ 180 °C ด้วยแรงอัด 6,8 และ 10 bar
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุรีไซเคิลที่นำมาผลิตซึ่งประกอบด้วย
 - 1.3.3.1 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test)
 - 1.3.3.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

- 1.3.3.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact Test)
- 1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุรีไซเคิลที่นำมาผลิตซึ่งประกอบด้วย
 - 1.3.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)
 - 1.3.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)
 - 1.3.4.3 การทดสอบการพองตัว (Thickness Swelling Test)
 - 1.3.4.4 การทดสอบความหนาแน่น (Density Test)
 - 1.3.4.5 การทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน (Thermal Resistance and Thermal Conductivity Test)
- 1.3.5 ผลิตเป็นแผ่นมุงหลังคา ขนาดกว้าง 99 ซม. ยาว 240 ซม. จำนวน 10 แผ่น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 วางแผนการทำงาน
- 1.4.2 จัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุ ในการดำเนินงาน
- 1.4.3 ดำเนินการทำชิ้นงานทดสอบ
- 1.4.4 ดำเนินการทดสอบสมบัติชิ้นงานทดสอบ
- 1.4.5 ประเมินผลการทดสอบ
- 1.4.6 สรุปผลการดำเนินงาน
- 1.4.7 สร้างผลิตภัณฑ์แผ่นมุงหลังคา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เป็นที่ทราบดีว่าไม้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญในการทำเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นการนำเศษกล่องเครื่องตีกลับมาทำเป็นแผ่นไม้ เป็นการใช้วัสดุซ้ำจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ไม้จริง ซึ่งเป็นทรัพยากรจากธรรมชาติ
- 1.5.2 ช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม โดยการลดปริมาณขยะที่ทิ้งบนพื้นโลกและนำขยะนั้นกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สำหรับกรณีกล่องนมและกล่องเครื่องตีประเภทต่างๆและช่วยลดหมอกควันในบรรยากาศ เนื่องจากการเผาทำลาย
- 1.5.3 เป็นการเสริมสร้างประสบการณ์ และสั่งสมความรู้ด้านเทคโนโลยีเฉพาะทางให้แก่บุคลากรผู้ปฏิบัติงาน เช่น วิธีการขึ้นรูป วิธีการทดสอบ และกระบวนการเวียนทำใหม่ของวัสดุรีไซเคิลแต่ละชนิด
- 1.5.4 เศษกระดาษกล่องนม สามารถเพิ่มมูลค่า โดยการนำมาทำเป็นเยื่อใช้ซ้ำแทนการทิ้งเป็นเศษขยะอย่างที่เป็นอย่างในปัจจุบัน ถ้าทำเป็นแผ่นไม้ สามารถขายได้ในราคาแผ่นละ 300-400 บาท
- 1.5.5 สามารถนำมาทำเป็น อุตสาหกรรม SMEs
- 1.5.6 สามารถบูรณาการจากงานวิจัยสู่การบริการชุมชน และ การเรียนการสอน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติของแผ่นมุงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิลในด้านการทดสอบ การทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก การทดสอบการโค้งงอ การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบ การดูดซึมน้ำ การทดสอบความเป็นฉนวน ซึ่งใช้พลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ มาอัดขึ้นรูปร้อน ดังนั้น คณะผู้จัดทำวิจัย จึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อนำมาหาประสิทธิภาพในการใช้งานและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์

2.1 นิยามศัพท์สำคัญ

2.1.1 ยูเอชที (อังกฤษ: UHT) ย่อมาจาก Ultra-High-Temperature Processing หรือ Ultra-Heat Treatment จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ยูเอชที> [1] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า เป็นวิธีการฆ่าเชื้อสำหรับอาหาร โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงเป็นเวลาสั้นๆ ประมาณ 1-2 วินาทีที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส (275 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สปอร์ในน้ำนมถูกทำลายจนหมด กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิสูงนี้ คิดค้นเป็นครั้งแรกในทศวรรษ 1960 โดยใช้กับน้ำนมเป็นที่รู้จักกันในชื่อนมยูเอชที ในปัจจุบันยังใช้ถนอมอาหารอื่นๆ เช่น น้ำ-ผลไม้ ครีม โยเกิร์ต ไวน์ นมยูเอชทีสามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องได้นาน 6 - 9 เดือน เปรียบเทียบกับนมพาสเจอร์ไรส์ ที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส (161.6 องศาฟาเรนไฮต์) เป็นเวลาอย่างน้อย 15 วินาที ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำในตู้เย็นได้นาน 2 - 3 สัปดาห์

2.1.2 อลูมิเนียมฟอยล์ จาก <http://www.unifoil-thailand.com/Aluminium.php> [2] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ทำจากโลหะอลูมิเนียมซึ่งถูกนำมาหลอมและรีดให้เป็นแผ่นบาง เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถรักษาความสดของอาหาร ป้องกันการสูญเสียจากการซึมผ่านของไอน้ำและน้ำมันได้ดี นอกจากนี้ยังป้องกันอากาศภายนอก และสิ่งแปลกปลอมเข้าไปสัมผัสกับอาหารด้วย จึงนิยมนำมาห่ออาหารเพื่อเก็บไว้ในตู้เย็น ห่อแซนด์วิชและอาหารสำหรับการไปปิกนิก รวมถึงห่ออาหารเพื่อนำเข้าอบหรือย่างด้วย

2.1.3 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จาก <http://www.sombatnet.com/2012/07/polyethylene-pe.html> [3] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมเลกุลของ LDPE มีแบ็กโบนคาร์บอนที่มีไฮโดรเจนของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับแบ็กโบนหลักอย่างสุ่มๆ LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะว่ามันแพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมี LDPE ถูกขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่น

2.1.4 การอัดขึ้นรูป (พลาสติก) จาก <http://www.assabth.com/th/extrusion-plastics.php> [4] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ในการอัดขึ้นรูป พลาสติกร้อนจะถูกอัดผ่านช่องในแม่พิมพ์เพื่อสร้างรูปทรงที่ต้องการ ชิ้นงานที่ดันออกมาจะถูกทำให้เย็นโดยสัมผัสกับอากาศ ผนัง อุณหภูมิห้อง หรือผ่านอ่างน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือผ่านลมอัดก่อนที่จะถูกตัดให้ได้ความยาวตามต้องการ เพื่อให้มั่นใจว่ารูปร่างและ

ขนาดสำเร็จรูปตามต้องการ อุปกรณ์ปรับขนาดแบบพิเศษจะถูกนำมาใช้ในขณะทำให้เย็นเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีผลกระทบสูง ดังนั้นการอัดขึ้นรูปจึงใช้ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่างๆ ที่ต้องการคุณสมบัติที่จำเป็นต่างกันไปตามการใช้งาน อุปกรณ์ปรับขนาดส่วนมากทำจากอลูมิเนียมเนื่องจากต้องการทำเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งแม่พิมพ์โดยทั่วไปผลิตด้วยเหล็กกล้า ข้อกำหนดด้านความแข็งแรงของแม่พิมพ์เหล็กกล้าอยู่ในระดับปานกลาง ในขณะที่ความต้องการการทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อการสึกหรอนั้นมีสูง โดยทั่วไปเหล็กเกรดที่มีการชุบแข็งแล้ว มีความแข็งแรงที่เพียงพอสำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปทั่วไป

2.2 แนวคิด

เนื่องจากในปัจจุบันกล่องนมหรือกล่อง UHT ในประเทศไทยมีการเพิ่มเป็นจำนวนมากที่บรรจุผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย มากมาย จากการศึกษายอดการผลิตกล่อง UHT ของบริษัท อิชิตันกรุ๊ป จาก <http://www.set.or.th> [5] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ยอดผลิตกล่อง UHT จำนวน 200 ล้านกล่องต่อปี ประกอบกับการบริโภคของบุคคลทุกเพศทุกวัยในประเทศไทย ในแต่ละวันมีกล่องนมที่ทิ้งเป็นขยะจำนวนมากเช่นกัน เมื่อกล่องเครื่องดื่มมากขึ้นก็ผลิตภัณฑรีไซเคิลหลายอย่างที่ผลิตจากกล่อง UHT มีผลิตภัณฑ์อีกอย่างที่เกิดขึ้นคือ หลังคาจากวัสดุรีไซเคิลที่ได้จากการแยกเยื่อกระดาษออกจากพลาสติกและอลูมิเนียมพอยล์ จากนั้นจึงได้นำอลูมิเนียมพอยล์และพลาสติกมาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมทั้งสองชนิดนี้ มีสมบัติทนไฟ มีความยืดหยุ่น ไม่ดูดความชื้นและไม่ดูดซึมน้ำ ข้อมูลที่ทางกรมวิทยาศาสตร์บริการมีข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตกล่อง UHT จาก <http://science.srru.ac.th> [6] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ผู้ผลิตกล่องปลอดเชื้อรายใหญ่ของประเทศ รายงานว่าในปี 2543 มีการผลิต 2,000 ล้านกล่อง และในปี 2545 ยอดพุ่งสูงขึ้นเป็น 3,000 ล้านกล่อง และเมื่อคำนวณเป็นน้ำหนักของที่ต้องกำจัดทิ้งจะมีปริมาณมากถึง 30,000 ตัน/ปี ซึ่งเป็นจำนวนขยะที่ไม่ใช่น้อย ด้วยเหตุนี้ จึงได้จัดทำโครงการศึกษาวิจัยเพื่อกำจัดพร้อมสร้างมูลค่าขยะกล่องนมโดยนำเศษขยะกล่องนมเหล่านี้มาผ่านกระบวนการรีไซเคิล เพื่อนำมาผลิตเป็นเยื่อเวียนทำใหม่ (Recycled Pulp) สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษชนิดอื่นต่อไป บรรดานมกล่องทั้งหลายที่เมื่อกินเสร็จกล่องก็จะกลายเป็นขยะ แต่วันนี้มีวิธีแปลงขยะให้เป็นเงินแล้ว สำหรับวัสดุที่นำมาทำกล่องปลอดเชื้อจะต้องได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ลักษณะโครงสร้างของกล่องผลิตเยื่อเวียนทำใหม่ฟอกขาวจากเศษกระดาษกล่องนมแล้ว ตกประมาณ 5,000 บาท/ตัน (ไม่รวมค่าวัตถุดิบ) แต่ราคาซื้อขายของเยื่อเวียนทำใหม่ อยู่ในประมาณ ตันละ 25,000 บาท สถานที่แยกขยะกระดาษ ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวคือ ได้เทคโนโลยีการรีไซเคิลกล่องนม สามารถสร้างมูลค่าจากขยะ ซึ่งถ้าทำได้เป็นอุตสาหกรรม จะมีรายได้ถึงปีละ 375 ล้านบาทต่อปี และเป็นการสร้างงานสร้างรายได้ให้แก่ชุมชน ในด้านสิ่งแวดล้อมสามารถลดขยะจากกล่องนมลงได้ในปริมาณมาก นอกจากนั้นยังเป็นการส่งเสริมการสร้างวัสดุใหม่ โดยการนำเอาพลาสติกมาหลอมใหม่ ทำเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น ไม้บรรทัด ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษกว่าพลาสติกธรรมดา คือ จะมีความยืดหยุ่นตัวมากกว่า และจาก คุณสมบัติดังกล่าวจะมีโอกาสขยายการใช้งานเพื่อเป็นวัตถุดิบในการสร้างผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ อีกในอนาคต

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การศึกษาเกี่ยวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่นำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ พอลิเอทิลีนกับการขึ้นรูปใหม่ จีราภรณ์ คาศรี [7] ได้กล่าวไว้ว่างานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้ซีลี้อย่างพาราเป็นสารเสริมแรงโดยได้ศึกษาวิธีการผสมของพอลิ-เมอร์ผสมซึ่งพบว่าการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวตามด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และจากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากการยึดติดระหว่างภูมิภาคต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด ได้แก่ คลอรีเนต พอลิเอทิลีน (CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิวอะไครเลต (PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Elvaloy) จากการศึกษาพบว่า พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิวอะไครเลต (PA 20) ให้สมบัติโดยรวมที่เหมาะสมในการนำไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิต สำหรับการทดสอบโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์คาร์บอน 13 พบว่า PVC ไม่เกิดการตอกกับ LDPE และที่อัตราส่วน PVC 100 DPE 10 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอนุมูลอิสระของ PVC และ LDPE ระหว่างกระบวนการผสม แต่เมื่อใส่สารช่วยผสมชนิด PA 20 และผงไม้ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC มีค่าต่ำลง ในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อใช้สารช่วยผสมการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ดีขึ้นและอนุภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนคล้ายแก้ว การถ่านโอนอุณหภูมิของวัสดุคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature : Tg) ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE และ II Elvaloy มีค่าลดลงโดยที่ Tg ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วย สารช่วยผสมชนิด PA 20 มี Tg ใกล้เคียงกับ PVC บริสุทธิ์มากกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy สำหรับสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและ ซีลี้อย่างพารา พบว่าเมื่อปริมาณซีลี้อย่างพาราเพิ่มขึ้น โมดูลัสการดึงยึดและโมดูลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงโดยที่สมบัติต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 แนวคิดในการทำโครงการครั้งนี้ เพื่อที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุผสมหลังจากวัสดุรีไซเคิล ซึ่งในการศึกษาสมบัติของวัสดุในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็ง การทดสอบหาค่าความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า การพองตัวด้านความหนา การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก ผู้จัดทำโครงการจึงได้ศึกษาค้นคว้า และได้จัดทำผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคาแบบลอนขึ้นมามีจำนวน 10 แผ่น มีขนาดกว้าง 99 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร

2.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของเส้นใยสับปะรดกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต รังสิมา ชลคุปรัตน์า ต้นทเทอดธรรม และ สุชาติ อุชชิน[8]ได้กล่าวไว้ว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เส้นใยสับปะรด (Pineapple Leaf Fiber, PALF) เสริมแรงให้กับคอมโพสิตเอ-ทิลีนไวนิลอะซิเตต

(Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เปรียบเทียบกับคอมโพลีเอทิลีนชนิด Low Density Polyethylene (LDPE) โดยทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใย (0 - 20 %) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเอทิลีนทั้งสอง ผลที่ได้พบว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านแรงดึงของคอมโพลีเอทิลีนทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่คอมโพลีเอทิลีน EVA ให้ผลของการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ คอมโพลีเอทิลีน LDPE โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใยมากกว่า 15 % จากลักษณะสัณฐานสามารถเห็นการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ของคอมโพลีเอทิลีนทั้งสองไม่แตกต่างกัน แต่เห็นการขาดของเมทริกซ์ EVA แบบเปราะ (Brittle) ขณะที่เมทริกซ์ของ LDPE จะเห็นผิวหน้ามีการยืดตัวแบบเหนียว (Ductile) ลักษณะกราฟของความเค้นและความเครียดของคอมโพลีเอทิลีน EVA มีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น ขณะที่คอมโพลีเอทิลีน LDPE ที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ ให้ลักษณะกราฟที่มีจุดคราก (Yield Point) ส่วนค่า Stress Efficiency Factor ของเส้นใยในคอมโพลีเอทิลีน EVA มีค่ามากกว่าในคอมโพลีเอทิลีน LDPE เนื่องจากผลของโครงสร้างพอลิเมอร์ EVA ที่มีหมู่ที่ขอบนนำมากกว่า

2.3.3 ปริมาณพินท์ สุกัทร่า บุตรทองคำ และมูกระวี พรหมศรีชา [9] ได้สรุปไว้ว่า ได้ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกคอมโพลีเอทิลีนที่ได้จากการผสมระหว่างพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene ; LDPE) และเถ้าลอย (Fly Ash) เพื่อผลิตพลาสติกคอมโพลีเอทิลีนที่มีสมบัติเชิงกลที่ยืดหยุ่นเหมือนพลาสติกบริสุทธิ์ซึ่งสามารถนำไปใช้งานเชิงวิศวกรรมได้และเป็นทางเลือกหนึ่ง ในการนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัสดุคอมโพลีเอทิลีนโดยทำการศึกษาปริมาณของเถ้าลอยที่เหมาะสมตั้งแต่ 30 ถึง 50 ส่วนในพลาสติก LDPE ร้อยส่วนโดยเริ่มทำการเตรียมพลาสติกคอมโพลีเอทิลีนบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่น ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน และขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าฟิล์มแล้วจึงนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานได้แก่ความต้านทานแรงกระแทก (ASTM D 256) ความแข็ง (Shore D : ASTM D 2240) ความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง (ASTM D 790) และความต้านทานต่อแรงดึง (ASTM D 638) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพลีเอทิลีนที่มีอนุภาคเถ้าลอยในปริมาณต่างกันเป็นตัวเสริมแรงจากการทดสอบพบว่าเมื่อผสมอนุภาคเถ้าลอยลงในพลาสติก LDPE มากขึ้นจะทำให้พลาสติกคอมโพลีเอทิลีนที่ได้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งมอดูลัสดัดโค้งและความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ค่าความต้านทานแรงกระแทกค่ามอดูลัสยั้งส์และมอดูลัสการดัดโค้งเมื่อเติมในปริมาณมากขึ้นและจะค่อยๆลดลงเมื่อเติมในปริมาณมากขึ้นความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยในปริมาณเพิ่มมากขึ้นและจะค่าลดลงตามลำดับเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากกว่า 35 ส่วนใน LDPE ร้อยส่วนดังนั้นจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเถ้าลอยสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งให้แก่พลาสติกคอมโพลีเอทิลีนได้รวมทั้งสามารถเติมเถ้าลอยได้มากถึง 50 ส่วนใน LDPE ร้อยส่วนเพื่อลดต้นทุนในการผลิตโดยยังรักษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกคอมโพลีเอทิลีนได้

2.4 ทฤษฎีที่สำคัญ

2.4.1 การรีไซเคิลกล่องเครื่องดื่ม <http://www.tcdc.or.th> [10] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า การรีไซเคิลกล่องนมเพื่อเราเพื่อธรรมชาติ เพื่อโลกปัจจุบันกล่องเครื่องดื่ม เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เพราะกล่องปลอดภัยที่คงคุณค่าและเก็บความสดใหม่ให้กับเครื่องดื่มได้นานถึง 6 เดือน โดยไม่ต้องใส่วัตถุกันเสีย และไม่ต้องแช่เย็น ปลอดภัยสำหรับผู้บริโภคทุกวัย เมื่อไม่ต้องแช่เย็นก็ไม่ต้องเปลืองค่าไฟ น้ำหนัก กล่องเบา

ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในการขนส่งกระดาษ เป็นวัสดุหลักในการผลิตกล่องมาจากสวนป่าที่ปลูกทดแทน ต่อเนื่องพร้อมหมุนเวียนมาใช้ใหม่เพื่อทดแทน (Renewable) จึงไม่ต้องทำลายป่าไม้จากธรรมชาติ จะเห็นได้ว่าเจ้ากล่องเครื่องดื่มนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่รักษาสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่กระบวนการผลิต จนถึงการนำไปรีไซเคิล ซึ่งไม่มีส่วนใด เหลือทิ้งเป็นขยะเลยทีเดียว กล่องเครื่องดื่มที่เหล่านี้สามารถนำมาสร้างผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายอย่าง กระดาษเครื่องดื่มผลิตมาจากเยื่อกระดาษที่มีเยื่อใยยาวและเยื่อกึ่งเคมีที่ไม่เคยใช้งานมาก่อน เยื่อกระดาษจึงมีความแข็งแรงกว่าเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษเก่า (Old Corrugated Carton Boxes) ที่ผ่านการรีไซเคิลมาหลายครั้ง ดังนั้น เยื่อกระดาษที่ได้มาจากกล่องเครื่องดื่ม จึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็นกระดาษกล่องที่ต้องการความแข็งแรงสูง ส่วนพลาสติกและฟอยล์สามารถนำไปทำเป็นอุปกรณ์พลาสติกที่ต้องการความแข็งแรง เช่น ด้ามจับกระทะ หรือผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลทั่วไป กล่องเครื่องดื่มที่ใช้แล้ว จะถูกนำมาตัดย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนที่จะนำมาโรยบนแผ่นเหล็ก เพื่อขึ้นรูป แผ่นตามความหนาที่ต้องการ จากนั้นนำเข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมพลาสติกที่ปนอยู่แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องอัดเย็นโดยพลาสติกจะเป็นตัวยึดกระดาษและอลูมิเนียมฟอยล์ให้ติดเป็นเนื้อเดียวกันจึงไม่จำเป็นต้องใช้กาวหรือสารเคมีใดๆ เลยในขั้นตอนการผลิต

2.4.2 กล่องเครื่องดื่ม จาก <http://www.ampolfood.com> [11] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า กล่องที่ใช้บรรจุนม UHT เราเรียกว่า “ เต็ดตราแพ็ค ” นั้นประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิด คือ กระดาษ 75 % โพลีเอททิลีน 20 % และอลูมิเนียมฟอยล์ 5% ประกอบเข้าด้วยกัน ถึง 6 ชั้น แต่ละชั้นมีหน้าที่ ดังนี้

ชั้นที่ 1 อลีโอททิลีน เป็นฟิล์มบางเคลือบด้านนอกเพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอก

ชั้นที่ 2 กระดาษ เพื่อรักษารูปร่างของกล่องให้กล่องคงทนแข็งแรง การพิมพ์ฉลากก็ จะพิมพ์ที่ชั้นนี้

ชั้นที่ 3 พอลีเอททิลีน เป็นตัวเชื่อมระหว่างชั้นกระดาษกับอลูมิเนียมฟอยล์ ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท

ชั้นที่ 4 อลูมิเนียมฟอยล์ ป้องกันอากาศ (ออกซิเจน) แสงสว่าง และกลิ่นจากภายนอก

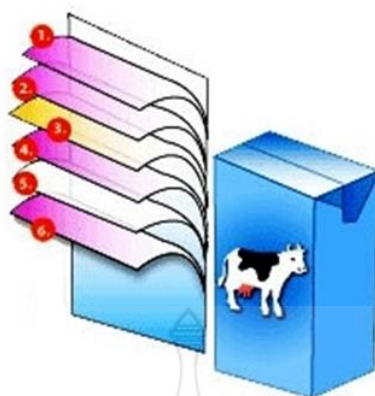
ชั้นที่ 5 พอลีเอททิลีน เป็นตัวเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกชั้นในสุด ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท

ชั้นที่ 6 พอลีเอททิลีน ป้องกันการรั่วซึมของนมที่อยู่ในกล่อง

นอกจากนั้น การบรรจุและปิดผนึกกล่องนม UHT ต้องบรรจุในห้องที่ปลอดเชื้อ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้นม UHT สามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเดือน โดยไม่ต้องแช่เย็นนั่นเอง



รูปที่ 2.1 กล่องเครื่องดื่ม UHT



รูปที่ 2.2 ชั้นของกล่อง UHT

ชั้นของกล่อง UHT

- | | |
|--------------------|--|
| 1. พอลิเอทิลีน | ป้องกันความชื้นจากภายนอก |
| 2. กระดาษ | เพื่อความคงทนแข็งแรงของกล่อง |
| 3. พอลิเอทิลีน | ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท |
| 4. อลูมิเนียมฟอยล์ | ป้องกันภาวะภายนอก |
| 5. พอลิเอทิลีน | ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท |
| 6. พอลิเอทิลีน | ช่วยยึดติดและป้องกันการรั่วซึมของของเหลว |

2.3.4 การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ (Polymer Processing) <http://epg.science.cmu.ac.th/> [12]

มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า การเปลี่ยนพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์คอมปาวน์ (Polymer Compound) ให้เป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างต่างๆ ในการทำให้พลาสติกเกิดเป็นรูปร่างต่างๆ นั้นต้องทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะของไหลโดยอาจทำให้พลาสติกเกิดการหลอมด้วยความร้อนหรือทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะสารละลาย ทั้งนี้เพื่อให้พลาสติกสามารถเกิดเป็นรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะชิ้นส่วนที่ควบคุมการเกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น แม่แบบหรือหัวตาย หลังการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจะต้องผ่านกระบวนการหล่อเย็นเพื่อให้สามารถคงรูปร่างได้ โดยในพลาสติกประเภทเทอร์มอพลาสติกจะเกิดการแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ในขณะที่พลาสติกประเภทเทอร์มอ-เซตจะเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Crosslinking) กระบวนการผลิตหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกมีหลายวิธี แต่วิธีที่สำคัญและนิยมทำกันในวงการอุตสาหกรรมพลาสติก ได้แก่ การฉีดพลาสติก (Injection Molding) การอัดรีด (Extrusion) การอัด (Compression Molding) การถ่ายโอน (Transfer Molding) การเป่า (Blowing) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การรีด (Calendaring) การอัดแบบชนิดหมุน (Rotation Molding) และการหล่อ (Casting) เป็นต้น

2.4.4 กระบวนการอัด (Compressed Molding) <http://epg.science.cmu.ac.th/> [13] ข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า เป็นการขึ้นรูปโดยการนำผงพลาสติกที่แข็งตัวมาอัดในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้กระบวนการนี้คือ ผงเมลามีน (Melamine) ขั้นตอนการผลิตทำโดย เริ่มจากนำผงพลาสติกมาซึ่งให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นและเป็นการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าแม่พิมพ์จากนั้นนำไปใส่แม่พิมพ์พอเริ่มปิดแม่พิมพ์อัดให้พลาสติกแพร่ตัวไปตามช่องว่างของ

แม่พิมพ์จะเริ่มหล่อข้างเพื่อให้พลาสติกได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น เมื่อถึงตำแหน่งสุดท้าย จะถึงช่วงเวลาแข็งตัวของพลาสติกเองโดยไม่ต้องใช้น้ำเย็น จากนั้นก็เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกได้การอัดร้อน



รูปที่ 2.3 ลักษณะเครื่องอัดและการขึ้นรูปแบบกระบวนการอัด(Compress Molding)

2.4.5 การทดสอบสมบัติวัสดุ

2.4.5.1 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (Modulus of Rupture : MOR)

<http://archmis.arch.nu.ac.th> [14] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติกและมักใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องทดสอบเหมือนการทดสอบความต้านทานแรงดึงนอกจากนี้การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่เพียงแต่ในบริเวณที่จะเกิดการเสียหายอีกด้วยอย่างไรก็ตามสภาพของแรงดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นงานของการทดสอบสองประเภทนี้จะแตกต่างกันโดยในการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (Uniform Tension) แต่ในการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอชิ้นงานจะได้รับแรงดึงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด (Non-Uniform Tension) เนื่องจากในสภาวะที่ชิ้นงานถูกดัดงอนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงสูงสุดบนพื้นผิวหนึ่งและได้รับแรงอัดสูงสุดบนพื้นผิวด้านตรงข้ามยกตัวอย่างเช่นในกรณีของวัสดุเนื้อเดียวภายใต้แรงดัดงอล้วนๆ (Pure Bending) พื้นผิวด้านล่างจะอยู่ภายใต้แรงดึงในขณะที่พื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจะอยู่ภายใต้แรงอัดถ้าวัสดุนี้มีค่ามอดูลัสของแรงดึงและแรงอัดที่เท่ากันบริเวณแนวกึ่งกลางของความหนาชิ้นงานทดสอบจะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงของสภาพแรงดึงสู่แรงอัดและมีค่าแรงกระทำในบริเวณเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะแต่ไม่เหมาะสำหรับพลาสติกอ่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มากเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุอยู่ในระดับต่ำวัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นและอยู่ภายใต้แรงดัดงอล้วนๆเท่านั้นดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่การทดสอบแบบ 3 จุด (Three

-Pointed Bending) และการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending) หน้าที่งานทดสอบจะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงของสภาพแรงดึงสูงสุดและมีความเค้นกระทำในบริเวณเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะแต่ไม่เหมาะสำหรับพลาสติกอ่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มากเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอจะถูกต้องในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุอยู่ในระดับต่ำวัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นและอยู่ภายใต้แรงดัดงอล้วนๆเท่านั้นดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยทั่วไปการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่การทดสอบแบบ 3 จุด (Three -Pointed Bending) และการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending)

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ σ_{\max} คือความเค้นสูงสุด มีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa)

M คือโมเมนต์ดัด มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร N*m ได้จากสมการ

$$M = \frac{F_{\max} L}{4} \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ F_{\max} คือ แรงกดสูงสุด Maximum Load มีหน่วยเป็น นิวตัน N

L คือ ความยาวช่วงพาด มีหน่วย เป็นเมตร (m)

C คือ ระยะห่างมากที่สุดจากแกนสะเทินซึ่งมีค่า เป็นครึ่งหนึ่งของความหนา มีหน่วยเป็น เมตร (m)

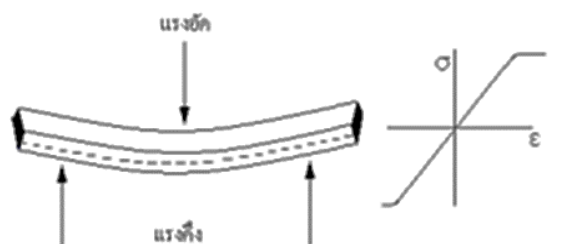
I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) มีหน่วยเป็นเมตร (m⁴)

คำนวณจากสมการ

$$I = \frac{bd^3}{12} \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

d คือ ความหนาชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)



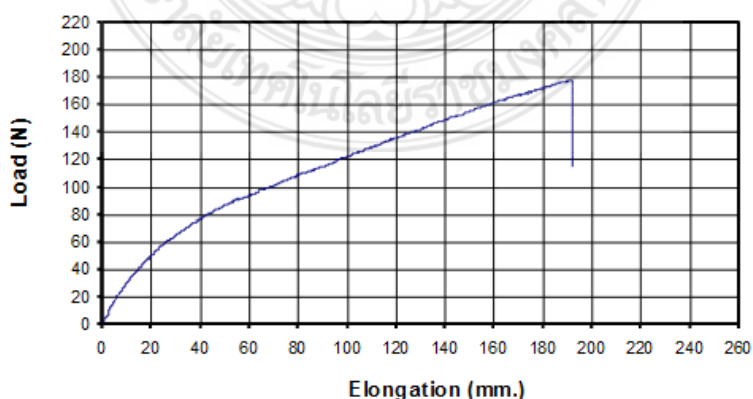
รูปที่ 2.4 หลักการทดสอบความต้านทานแรงดึงต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก

2.4.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test) <http://www.seem.kmutt.ac.th> [15] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรง Dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่นกรณีที่เป็นยางก็จะได้จากการตีแผ่นยางเป็นรูป Dumbbell ด้วย die (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ใน Compression Mould) ส่วนในกรณีของพลาสติก อาจจะได้จากกระบวนการฉีด (Injection Moulding) หรือได้จากการตัดแผ่นพลาสติกด้วย die ในทำนองเดียวกันกับยาง ถ้าหากพลาสติกดังกล่าวมีความแข็งต่ำ เช่น Plasticized PVC ในขณะทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine (ภาพที่ 2.5) โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง

ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง (ภาพที่ 2.6) ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว

จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนำมาคำนวณค่า tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

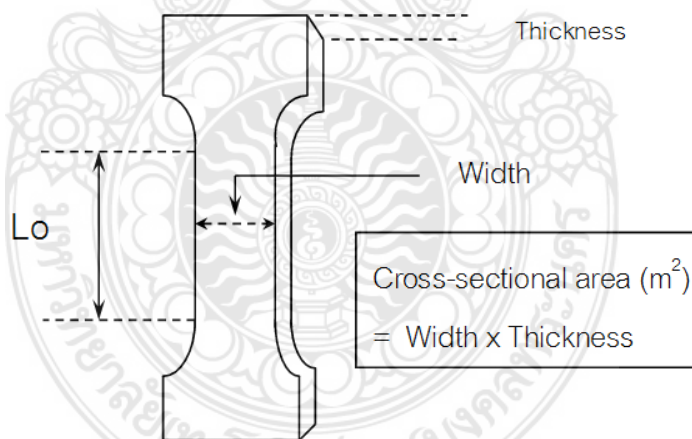
$$\begin{aligned} \text{Tensile stress (ความเค้น)} &= \text{แรง (N)} / \text{พื้นที่หน้าตัดบริเวณตรงกลาง (m}^2\text{)} \\ &= \frac{F}{A} \left. \begin{array}{l} \text{(N/m}^2\text{)} \\ \text{(MPa)} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tensile strain (ความเครียด)} &= \text{ระยะยืด/ระยะความยาว gauge เริ่มต้น} \\ &= \Delta L / L_0 \text{ (dimension less)} \dots\dots\dots(2.5) \end{aligned}$$

$$\text{Elongation (การยืดตัว)} = \text{ระยะยืด } (\Delta L), \text{ mm} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Tensile Modulus(ความแกร่ง)} = \text{Stress/strain (MPa)} \dots\dots\dots(2.7)$$

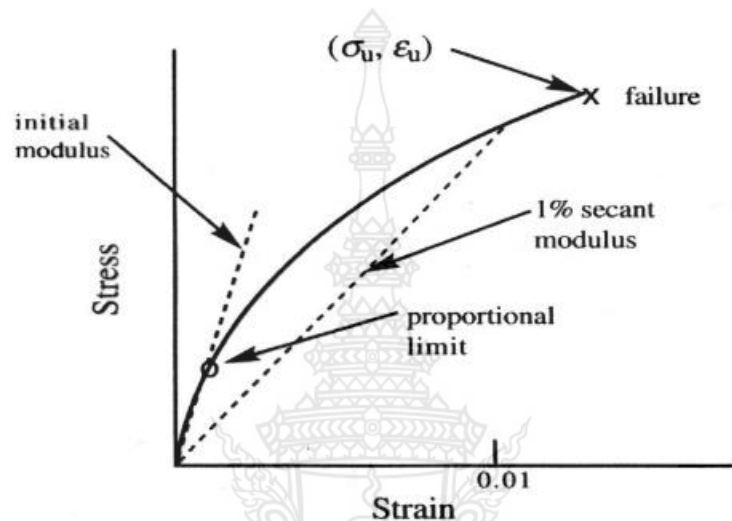
ค่าการยืดตัวภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูป dumbbell สำหรับการทดสอบแรงดึง โดยในการคำนวณค่าความเครียด (strain) จะใช้ค่า ΔL ต่อ L_0 ซึ่งต้องระวังด้วยว่าค่าที่ใช้ต้องเป็นค่าที่มาตรฐาน กล่าวคือ ΔL ควรวัดโดยใช้ extensometer จะแม่นยำกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทีวัสดุทดสอบเป็นยางที่ จะยืดตัวได้มากจนเข้าสู่บริเวณรอยคอดของชิ้นงานอย่างไรก็ตามกรณีที่เป็นพลาสติกแข็ง อาจจะอนุโลมให้ใช้ระยะเดินทางของมือจับ (grip) เป็น ΔL แทนได้ เนื่องจากพลาสติกแข็ง มักจะยืดตัวได้น้อยและนิกชาตก่อนจะเกิดการยืดบริเวณรอยคอด



รูปที่ 2.7 ขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

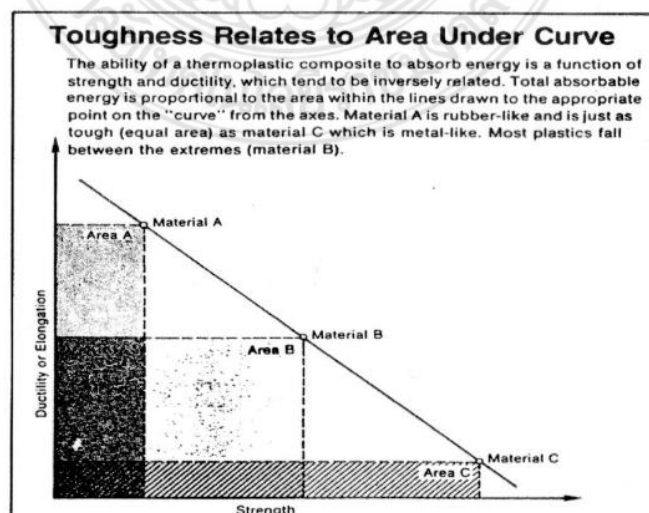
ส่วนค่า L_0 นั้นต้องดูตามมาตรฐานของ standard method ที่ใช้ทดสอบ (ASTM D638, JIS2000ISO, DIN) ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดชิ้นงานไม่เท่ากัน และมีระยะ gauge ไม่เท่ากัน และที่สำคัญต้องไม่เข้าใจผิดว่า L_0 คือระยะระหว่าง grip หรือ ระยะระหว่างรอยคอด ซึ่งถ้าใช้ค่า L_0 ในการคำนวณ strain ไม่ถูกต้อง จะทำให้ค่า strain และ modulus ที่ได้คลาดเคลื่อนและอาจมีปัญหาในการนำไปใช้อ้างอิงกับตัวอย่างข้างนอก ค่าการทนแรงดึงในบางครั้ง อาจจะรายงานผลกาทดสอบค่าการทนแรงดึงเป็นรูปของค่า Tensile Strength ซึ่งโดยปกติจะหมายถึงค่า Maximum Tensile Stress นอกจากนั้นบางกรณีอาจจะรายงานผลค่า Tensile Strength ที่จุดใด ๆ ก็ได้ เช่นที่จุดคราก (yield point) จะได้ tensile Strength at yield หรือที่จุดขาดจะได้ Tensile Strength Break ส่วนคำว่า Ultimate Tensile Stress (หรือ

strength) จะหมายถึงค่า Strength หรือ Stress ที่จุดสูงสุดของกราฟซึ่งอาจเป็นที่ break point หรือ yield point ก็ได้ค่าโมดูลัสค่าโมดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้นนี้จะได้จากการคิดคำนวณจากกราฟในช่วง linear หรือช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติก (ช่วงการยืดตัวหรือ strain น้อย ๆ) และบางครั้งจะเรียกค่าโมดูลัสในแบบดังกล่าวว่า Young's Modulus หรือ Initial Modulus นอกจากนี้ยังมีค่า โมดูลัสอีลักษณะหนึ่งคือ Secant Modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่างๆในเส้นกราฟ(ภาพที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 การหาค่าโมดูลัสในแบบต่างๆ(ที่มา “Polymer Science and Technology” edited by J.R.Fried, Prentice Hall PTR, USA, 1995)

ค่าความเหนียวจากการทดสอบสมบัติด้านการรับแรงดึง (tensile toughness) สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรง (N) กับระยะทางการยืดตัว (m) ซึ่งสัมพันธ์กับค่า stress และ strain ตามลำดับ อย่างไรก็ตามข้อควรระวังในการพิจารณาค่าความเหนียวจากวิธีการดังกล่าวข้างต้นคือการที่ตัวเลขที่เท่ากันอาจจะได้มาจากวัสดุที่มีพฤติกรรมต่างกันได้ เช่น วัสดุแข็งเปราะ (area A ภาพที่ 2.9) กับยางที่นิ่มยืดตัวสูงแต่ไม่แข็งแรง (area C) อาจจะมีพื้นที่เท่ากันแต่โดยทั่วไปแล้ว พลาสติกส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมแบบ area A และ B



รูปที่ 2.9 นิยามค่าความเหนียวที่ได้จากการทดสอบแรงดึงวัสดุพอลิเมอร์

สำหรับพฤติกรรมของกราฟ แรง กับ ระยะทาง (หรือ Stress – Strain) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัสดุ แต่ละประเภทนั้น จะแตกต่างกันออกไป

- วัสดุบางตัวจะนิ่ม และ ไม่แข็งแรง (Soft and Weak) เช่น เทียนไข พาราฟินส์ หรือ Wax

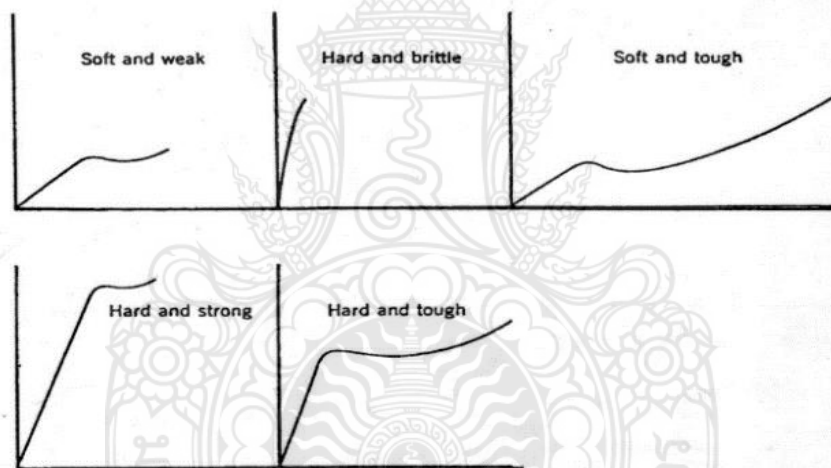
- วัสดุบางตัวจะแข็งแต่เปราะ (Hard and Brittle) เช่น PS, PMMA

- วัสดุบางตัวจะนิ่มแต่เหนียว (Soft and Tough) เช่น ยางธรรมชาติ NR

- วัสดุบางตัวจะแข็งและแข็งแรง (Hard and Strong) เช่น thermosets

- วัสดุบางตัวจะแข็งและเหนียว (Hard and Tough) เช่น Nylon, PC, Kevlar

ซึ่งแต่ละชนิดจะมีกราฟทั่วไปเป็นลักษณะดังนี้(ภาพที่ 2.10)

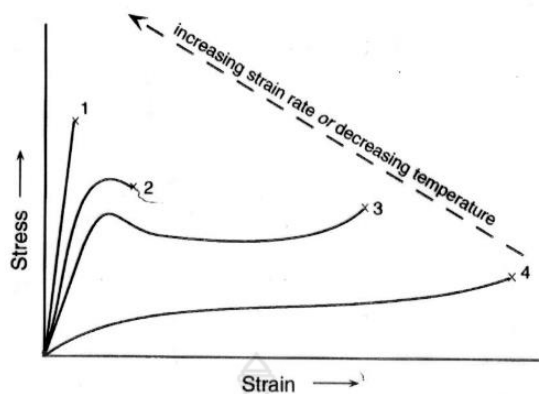


รูปที่
ลักษณะ

2.10
กราฟ

แรงดึง-ระยะทาง ของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่างๆ

จะเห็นได้ว่ามีค่าที่สำคัญอยู่ 3 กลุ่ม คือ soft/hard, brittle/tough, weak/strong ซึ่งค่าสำคัญทั้ง 3 กลุ่มจะสัมพันธ์กับสมบัติด้านการทนแรงดึง(Tensile Parameters) 3 ชนิดคือ Modulus, Toughness และ Stress (Strength) ตามลำดับผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วในการดึงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ในพฤติกรรมของกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไปถ้าหากอุณหภูมิขณะที่ทดสอบเปลี่ยนไป (รูปที่ 2.10) ยกตัวอย่างเช่น PMMA ซึ่งมีลักษณะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิห้องอาจจะแสดงกราฟที่มี yield point และมีการยืดตัวมากขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้น หรือในทางกลับกัน ยางที่มีการยืดตัวได้มากแต่มีความแข็งต่ำก็อาจจะมีการยืดตัวที่ลดลง และความแข็งเพิ่มมากขึ้นถ้าหากทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า Glass Transition Temperature ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก



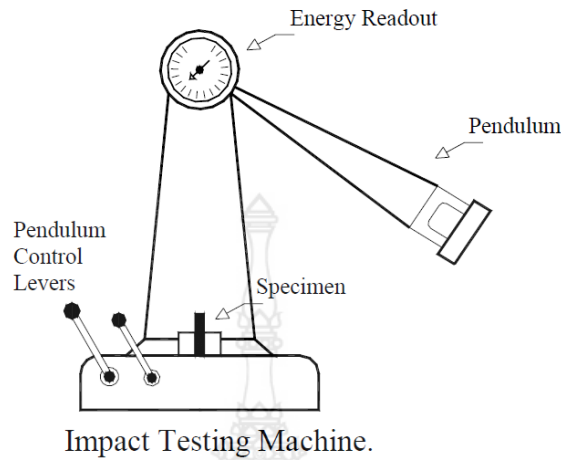
รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงลักษณะกราฟแรงดึงระยะทาง ของพอลิเมอร์ตามอุณหภูมิ อัตราการดึงทดสอบ

นอกจากนั้นความเร็วในการดึงก็จะมีผลต่อสมบัติด้านแรงดึงเช่นเดียวกัน โดยความเร็วในการดึงสูงจะทำให้พอลิเมอร์มีการตอบสนองในแบบบิลาสติกสูง หรือมีค่าโมดูลัสและความเค้นสูงแต่มีค่าการยืดตัวต่ำๆ ในทางตรงกันข้ามถ้าดึงพลาสติกอย่างช้า ๆ ด้วยความเร็วต่ำก็จะทำให้มีการยืดตัวมากขึ้นและมีโมดูลัสหรือความแข็งแรงน้อยลง ผลดังกล่าวเกิดจากการที่พอลิเมอร์มีลักษณะการตอบสนองต่อแรงกระทำที่ขึ้นกับเวลา โดยถ้ามีเวลาน้อย (ออกแรงกระทำเร็ว) พอลิเมอร์ไม่มีเวลาที่ผ่อนคลาย (Relax) โมเลกุลจึงเคลื่อนไหวได้น้อยและชิ้นงานไม่สามารถยืดตัวได้มากและต้านทานแรงดึง จึงขาดง่ายแต่แข็งแต่ถ้าดึงช้า ๆ โมเลกุลพอลิเมอร์จะมีเวลาในการคลี่คลายโครงสร้าง หรือเกิดการเคลื่อนไหว ทำให้มีการยืดตัวของชิ้นงานมากขึ้นโดยใช้แรงดึงที่น้อยลง ประเด็นเรื่อง Time - Temperature Dependence ของพอลิเมอร์นี้มีความหมายนัยสำคัญในแง่ของการนำไปใช้งาน โดยในแง่ของการนำไปใช้งานต้องระวังว่าถ้าทดสอบที่อุณหภูมิหรือความเร็วเท่าใดจะไม่สามารถเอาตัวเลขไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่อุณหภูมิและความเร็วที่ต่างกันได้ แม้ว่าจะเป็นวัสดุเดียวกันและเครื่องมือทดสอบเดียวกันก็ตามและในแง่ของการทำนายการใช้งานในสภาวะที่พอลิเมอร์จะต้องรับแรงเป็นเวลานาน ๆ ทั้งในลักษณะของ Constant Force (รูปทรงเปลี่ยนแปลงตามเวลา) หรือ Constant Strain (โมดูลัสลดลงตามเวลา) ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะจะไม่สามารถทำนายได้ด้วยผลการทดสอบจาก Static Tensile Test ที่กล่าวมาข้างต้น แต่อาจจะต้องทดสอบใน Mode ที่คล้ายคลึงกันมากกว่า นั่นคือ Creep Test และ Stress Relaxation Test ตามลำดับ โดยในกรณีวัสดุพลาสติกเมื่อให้แรงคงที่ก็จะมีค่าความเครียดคงที่และเมื่อหยุดออกแรงค่าความเครียดก็จะลดลงเป็นศูนย์แต่ในกรณีวัสดุมีพฤติกรรมแบบ Viscous เมื่อให้แรงคงที่ค่าความเครียดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา (Time Dependence) และคงที่ตลอดไป และแม้ว่าจะหยุดออกแรงค่าความเครียดก็ไม่ลดลงเป็นศูนย์

2.4.5.3 การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทก (Impact Properties Testing)

<http://www.seem.kmutt.ac.th> [16] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์จะมีจุดเด่นตรงที่เป็นการทดสอบด้วยอัตราการกระแทกด้วยความเร็วสูง โดยมีรูปแบบ 2 ลักษณะ คือ แบบ Pendulum Test และ Falling Weight Test ลักษณะการทดสอบแบบ Pendulum Test จะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทกชิ้นงาน พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัด (หน่วยเป็น ft-lbs) ซึ่งในกรณีที่ทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หัก

แสดงว่าพลังงานไม่พอ ซึ่งจะต้องเพิ่มน้ำหนักขึ้นไปอีก (หรือใช้เครื่องที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือ Specification ตรงกว่าชิ้นงานทดสอบจะต้องมีการทำรอยบากเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress Concentration Point) ดังภาพที่ 2.11



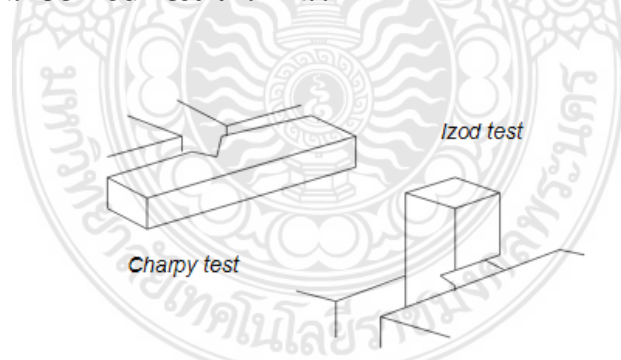
รูปที่ 2.12 การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทก โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น Impact Strength ได้จากสูตร

$$\text{Strength Impact} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Thickness (m)}} \dots\dots\dots(2.8)$$

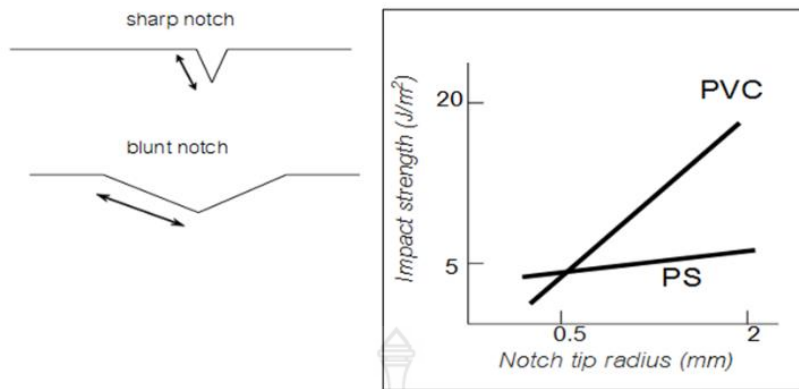
หรือบางกรณีจะใช้สมการ

$$= \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Area (notch) (m}^2\text{)}} \dots\dots\dots(2.9)$$

การวางชิ้นงานจะทำได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบของการทดสอบกล่าวคือถ้าเป็นแบบ Charpy Test จะวางแนวนอน แต่ถ้าเป็นแบบ Izod Test จะวางแนวตั้ง

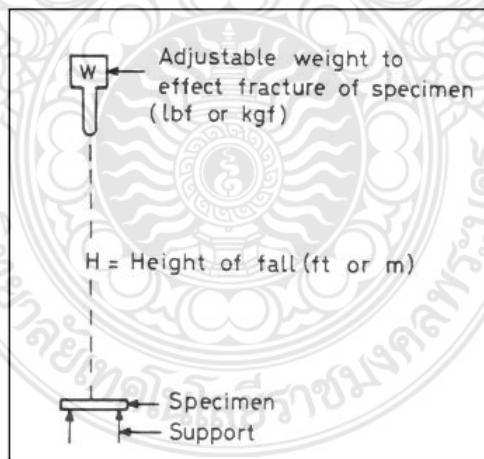


รูปที่ 2.13 รูปแบบการวางชิ้นงาน สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และCharpy สิ่งสำคัญหรือข้อควรระวังในการทดสอบแบบ Pendulum คือขนาดของรอยบาก (notch) ต้องคงที่เพราะขนาดจะมีผลต่อค่า Impact Strength ที่ได้ ตัวอย่างเช่นรอยบากที่แหลมกับรอยบากที่ทื่อหรือป้านกว่า จะให้ค่าไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วรัศมีของ Notch Tip ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Impact Strength สูงขึ้น



รูปที่ 2.14 ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก

นอกจากนั้นความเหนียวของชิ้นงานที่ได้จาก Tensile Test กับที่ได้จาก Impact Test อาจจะไม่สอดคล้องกันก็ได้ เนื่องจากการทดสอบที่สภาวะต่างกันโดยในกรณี Impact Test จะทดสอบด้วยความเร็วสูงมากและที่สำคัญคือชิ้นงานจะมีรอยบากหรือจุดรวมแรง ซึ่งพอลิเมอร์บางตัวจะมีความเหนียวลดลงอย่างมากถ้าหากมีตำหนิจุดรวมแรงเช่น Notch เช่น PVC, Nylon เป็นต้น สำหรับการทดสอบ Impact Test ในแบบสุดท้ายคือ Falling Weight Test ซึ่งจะเหมาะกับชิ้นงานที่เป็นแผ่น Sheet หรือชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์แล้ว เช่น หมวกกันน็อค เป็นต้น โดยในการทดสอบจะทำได้ 2 ลักษณะคือกำหนดให้ระดับความสูงของลูกน้ำหนักคงที่ แล้วทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งชิ้นงานแตก หรือในทางตรงกันข้ามอาจจะทดสอบโดยใช้น้ำหนักคงที่แล้วทำการปรับระยะความสูงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.15 การทดสอบแบบ falling weight

ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถนำมาคำนวณเป็นพลังงาน(impact energy)ได้ดังนี้

$$\text{Energy(J)} = hwf \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ h = ความสูง (mm)

W = น้ำหนัก (Kg)

F = ค่าที่ใช้แปลงหน่วยเป็น J(Nm)

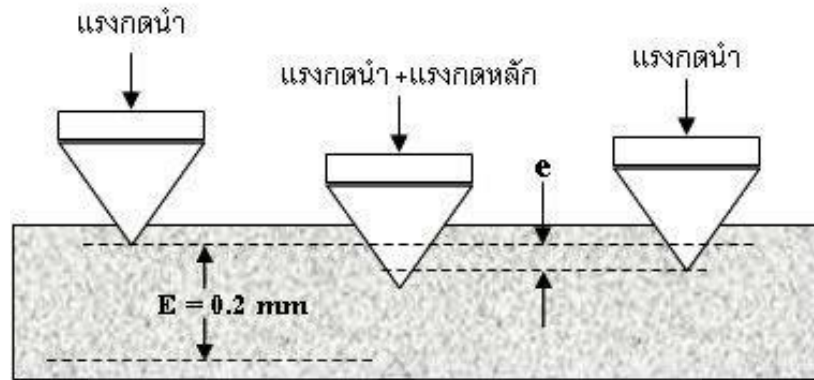
2.4.5.4 การทดสอบความแข็ง (hardness) <http://www.seem.kmutt.ac.th> [17] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (relative term) ค่าความแข็งที่กล่าวถึงนี้จะแตกต่างไปจากค่าความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) หรือค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) ของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น พอลิโพรไพลีนจัดเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hardness) สูง แต่ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานการขัดสีต่ำ การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ตารางที่ 2.1) กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิโพรไพลีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน

ตารางที่ 2.1 แสดงวิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่าง ๆ

วัสดุ	วิธีทดสอบ
ยาง	Shore A
PVC	Shore A
LDPE	Shore D
MDPE	Shore D
HDPE	Shore D
PP	Rockwell R
Toughened PS	Rockwell R
ABS	Rockwell R
PS	Rockwell M
PMMA	Rockwell M

ที่มา: <http://e-book.ram.edu>

การทดสอบแบบ Rockwell หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือ การวัดความลึกของลูกบอลเหล็กที่ใช้เป็นตัวกดวัด (Inventor) โดยในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนหลักคือ เริ่มจากการวางน้ำหนักร่อง (Minor Load) ประมาณ 10 กิโลกรัม ลงบนลูกบอลเหล็ก เพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงทำการ Set Zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าอาจจะเปลี่ยนแปลงไปอีกเนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของพอลิเมอร์)



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง Hardness แบบ Rockwell



รูปที่ 2.17 Rockwell Hardness Tester

หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major Load) ให้กับลูกบอลเหล็ก เป็นเวลานาน 15 นาที จากนั้นจึงยกน้ำหนักกดออก ปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) ต่ไปอีกประมาณ 15 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็ง Hardness จากสเกลของเครื่องวัด โดยจะมีหน่วยกำกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลข ขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กด (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 การทดสอบความแข็ง

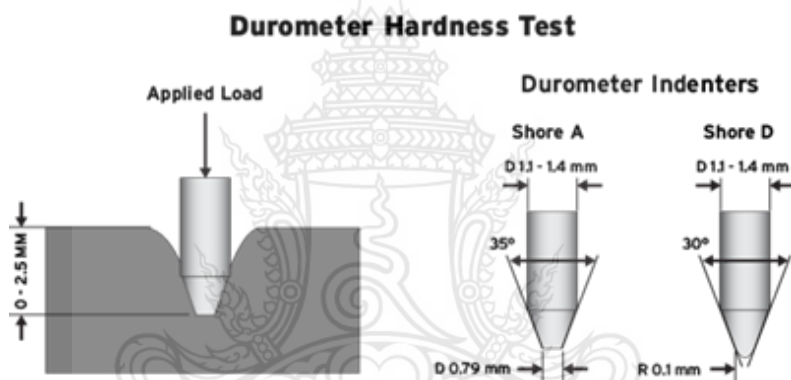
Scale	Major load (Kg)	Diameter of Indenter (in)
R	60	1/2
L	60	1/4
M	100	1/4
E	100	1/8

ที่มา : <http://www.seem.kmutt.ac.th>

โดยสเกล R และ L จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง Hardness ต่ำ ส่วนสเกล M และ E จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง hardness สูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้น ถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (Sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไป และต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

การทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์จะกระทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบกดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม (ถึงจุด Stop Ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่นประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก Durometer นี้จะไม่มีหน่วย

นอกจากนั้น Durometer ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และแบบ Shore D ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไป Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า ในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของ Durometer แบบ Shore A และ Shore D

2.4.5.5 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) <http://www.thaicermicsociety.or.th>[18] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพลาสติกส่วนใหญ่ ขึ้นอยู่กับชนิดและคอมโพสิทของวัสดุตัวอย่างเช่น วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอน อันได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน เป็นวัสดุที่ทนน้ำมาก ในขณะที่วัสดุที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนหรือกลุ่มออกซิไฮโดรเจนจะไวต่อการดูดซึมน้ำมาก วัสดุที่ประกอบด้วยคลอรีน โบรมีน หรือฟลูออรีน จะเป็นวัสดุที่ทนน้ำ ลักษณะการดูดซึมน้ำของพลาสติกอาจเปลี่ยนแปลงโดยการเติมสารเติมแต่ง ตัวอย่างเช่น เส้นใย เส้นใยแก้ว เป็นต้น พลาสติกบางประเภทดูดซึมน้ำได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ต้องการให้มีการดูดซึมน้ำต่ำได้แก่ ไบควนในเครื่องซักผ้า ผลิตภัณฑ์สำหรับใส่อาหาร สปริงเกลอร์ เป็นต้น การทดสอบการดูดซึมน้ำของพลาสติกสามารถทำได้ง่ายโดยอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เครื่องชั่งวิเคราะห์ (Analytical Balance) ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตู้อบ (Oven) ที่สามารถให้อุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ และโถดูดความชื้น (Desiccators) ซึ่งทดสอบอาจเป็นลักษณะแผ่นดิสก์แท่ง หรือท่อ ขนาดเปลี่ยนแปลงตามชนิดของชิ้นทดสอบ

วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ

1. อบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ 24 ชั่วโมง

2. ทิ้งให้ชั้นทดสอบเย็นลงในโถดูดความชื้น
3. ชั่งน้ำหนักชั้นทดสอบ (น้ำหนักก่อนการดูดซึมน้ำ)
4. แช่วชั้นทดสอบลงในน้ำกลั่น
5. เมื่อครบตามกำหนดเวลา นำชั้นทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วย ผ้าสะอาดหรือกระดาษทิชชู
6. ชั่งน้ำหนักชั้นทดสอบทันที (น้ำหนักหลังการดูดซึมน้ำ)
7. คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำตามสมการที่ 2.21

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{P_w - P_D}{P_D} \dots\dots\dots(2.11)$$

เมื่อ P_w = น้ำหนักชั้นทดสอบหลังการทดลองดูดซึมน้ำ

P_D = น้ำหนักชั้นทดสอบก่อนการทดสอบดูดซึมน้ำ

2.4.5.6 การทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำ <http://www.seem.kmutt.ac.th> [19] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า หมายถึง การขยายตัวของแผ่นทดสอบหลังจากการเกิดปฏิกิริยาการซึมซับน้ำของแผ่นทดสอบเมื่อแช่น้ำสามารถหาได้โดยการวัดความหนาแผ่นทดสอบก่อนการแช่น้ำลบความหนาแผ่นทดสอบหลังการแช่น้ำคิดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ การทดสอบสมบัติทางกายภาพการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำและค่าความหนาจากการพองตัวเมื่อแช่น้ำของชั้นทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จากนั้นนำไปแช่น้ำกลั่นโดนแช่ในขวดที่มีฝาปิดแน่นนำมาหาสมบัติของการดูดซึมน้ำ และการพองตัวเมื่อแช่น้ำดังนี้

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{w - w_0}{w_0} \times 100 \dots\dots\dots(2.12)$$

โดยที่ w คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังการแช่น้ำ (กรัม)

w_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบก่อนการแช่น้ำ (กรัม)

$$\text{การพองตัว (\%)} = \frac{T - T_0}{T_0} \times 100 \dots\dots\dots(2.13)$$

โดยที่ T คือ ความหนาหลังการแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

T_0 คือ ความหนาก่อนการแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

2.4.5.7 ความหนาแน่น <http://indyteather.wordpress.com> [20] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า (อังกฤษ: Density, สัญลักษณ์: ρ อักษรกรีก, โร) เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ยิ่งวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้น มวลต่อหน่วยปริมาตรก็ยิ่งมากขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง (เช่น เหล็ก) จะมีปริมาตรน้อยกว่าวัตถุความหนาแน่นต่ำ (เช่น น้ำ) ที่มีมวลเท่ากันหน่วยเอสไอของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3)

ความหนาแน่นเฉลี่ย (Average Density) หาได้จากผลหารระหว่างมวลรวมกับปริมาตรรวม ดังสมการ

$$\text{โดย } \rho = m/v \dots\dots\dots(2.14)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (Kg/cm^3)

m คือ มวลรวมของวัตถุ (Kg)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (cm³)

เครื่องมือที่ใช้วัดความหนาแน่นของของเหลวคือ พิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) เครื่องมือวัดความหนาแน่นของก๊าซคือ แก๊สปิคโนมิเตอร์ (Gas Pycnometer) ความหนาแน่นของสสารต่างๆ สสารที่มีความหนาแน่นสูงสุดที่รู้จักกัน คือ สสารที่อยู่ในดาวนิวตรอนที่เรียกว่า นิวตรอนเนียมใจกลางหลุมดำ ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ไม่มีปริมาตร ดังนั้นจึงไม่สามารถหาความหนาแน่นได้ สสารที่หนาแน่นที่สุดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนโลก คือ ธาตุอริเดียม มีความหนาแน่นประมาณ 22650 Kg/cm³



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างคอลัมน์สำหรับ
Technique

ทดสอบแบบ Density Gradient

2.4.5.8 การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต <http://lib3.dss.go.th/fulltextldss> [21] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า หลักการวัดค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) วัสดุใดมีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีหรือไม่นั้น เราสามารถพิจารณาได้จากค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity, K-Value) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ โดยวัดค่าอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K) นอกจากนี้ความเป็นฉนวนกันความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance, R-Value) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาต่อค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็นตารางเมตร-เคลวิน ต่อวัตต์ (m².K/W) ฉนวนกันความร้อนที่ดีต้องมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง ค่าสภาพนำความร้อน (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad \text{หน่วย วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K)} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

โดย k = สภาพนำความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K)

Q = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วย วัตต์ (W)

A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วย ตารางเมตร (m²)

L = ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วย เมตร (m)

ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วย เคลวิน (K)

ค่าความต้านทานความร้อน (R) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

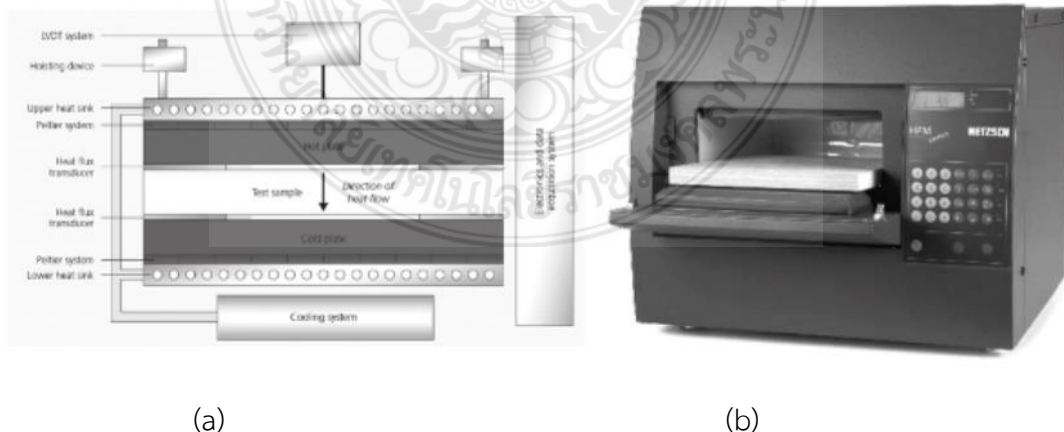
$$R = \frac{L}{K} \text{ หน่วย ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ (m}^2\text{.K/ W)(2.16)}$$

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(Overall heat transfer coefficient, value)

คือส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$U = \frac{1}{R} \text{ หน่วย ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ (W/m}^2\text{.K)(2.17)}$$

การทดสอบแบบ Heat Flow Meter การทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อน แบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BS EN 12667 และ JIS A 1412 ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนคือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.19 (a) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ $22 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 10 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง โดยมวลของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบโดยวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็น ดังแสดงในภาพที่ 2.19 (b) จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิให้แตกต่างกัน (ΔT) ระหว่างแผ่นอุณหภูมิความร้อนและแผ่นความเย็น ภายในเครื่องทดสอบมีฉนวนล้อมรอบตลอดแนวความหนาของแผ่นอุณหภูมิและชิ้นทดสอบเพื่อให้ป้องกันการสูญเสียความร้อน เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ที่ติดอยู่กับผิวของแผ่นอุณหภูมิทั้งสองโดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นทั้งสอง เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state condition) กรมวิทยาศาสตร์บริการให้บริการทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนสำหรับฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต ด้วยเครื่อง NETZSCH HFM 436 เป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter โดยตัวอย่างต้องมีขนาด กว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และความหนาอยู่ในช่วง 6 - 80 มิลลิเมตร

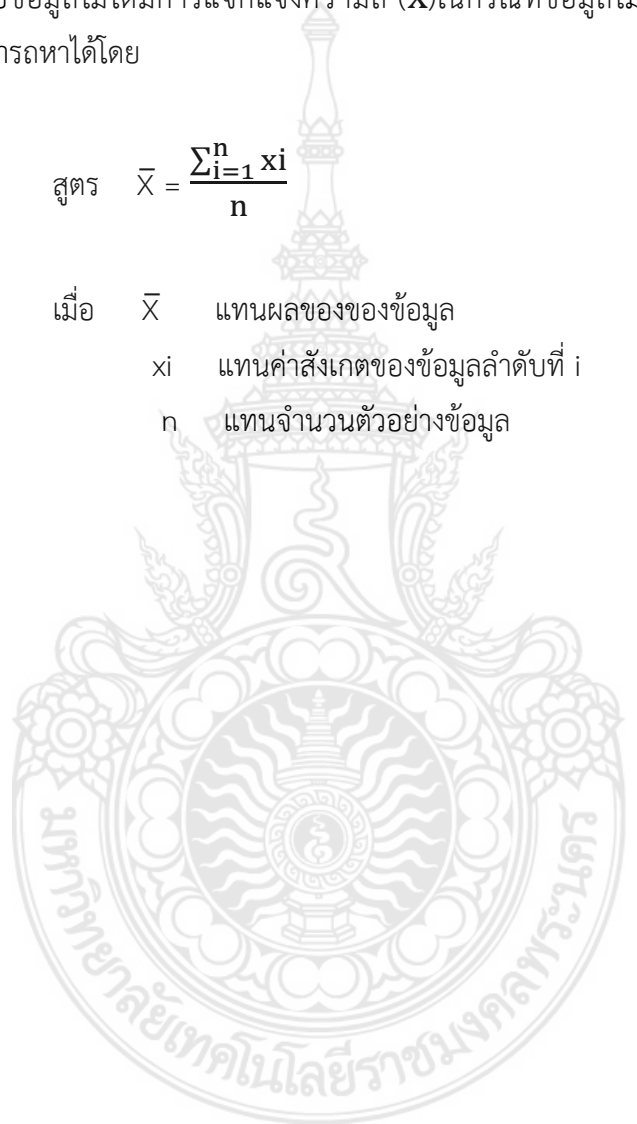


รูปที่ 2.20 (a) การออกแบบเครื่องมือวัดแบบ Heat Flow Meter, (b) เครื่อง HFM 436/3 Lambda ที่ใช้หลักการแบบ Heat Flow Meter

2.4.6 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต <http://satitpra.sarnmit.ac.th> [22] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า (Arithmetic Mean, Average , \bar{X}) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต(\bar{X}) จัดว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญมากในวิชาสถิติ เพราะค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ตีที่สุด เป็นค่าที่ไม่เอนเอียง เป็นค่าที่มีความคงเส้นคงวา เป็นค่าที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด และเป็นค่าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ค่าเฉลี่ยเลขคณิตก็มีข้อจำกัดในการใช้ เช่น ถ้าข้อมูลมีการกระจายมาก หรือข้อมูลบางตัวมีค่ามากหรือน้อยจนผิดปกติ หรือข้อมูลมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว ค่าเฉลี่ยเลขคณิตจะไม่สามารถเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลได้ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตเมื่อข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ (\bar{X}) ในกรณีที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสามารถหาได้โดย

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ \bar{X} แทนผลของของข้อมูล
 x_i แทนค่าสังเกตของข้อมูลลำดับที่ i
 n แทนจำนวนตัวอย่างข้อมูล



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวในบทที่ 2 จึงได้มีการนำเอาข้อมูลมาศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจที่จะสามารถกำหนดแนวทางในการดำเนินงานที่สามารถปฏิบัติงานจริงได้ มีความสมบูรณ์ในการจัดทำเสร็จสิ้นตามกำหนดเวลา เพื่อให้ได้ข้อมูลตรงตามวัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการและมีความสอดคล้องกับจุดประสงค์ของวิชาโครงการ จึงได้มีการกำหนดขั้นตอนและการดำเนินงานของโครงการไว้ดังนี้

3.1 การวางแผนงาน

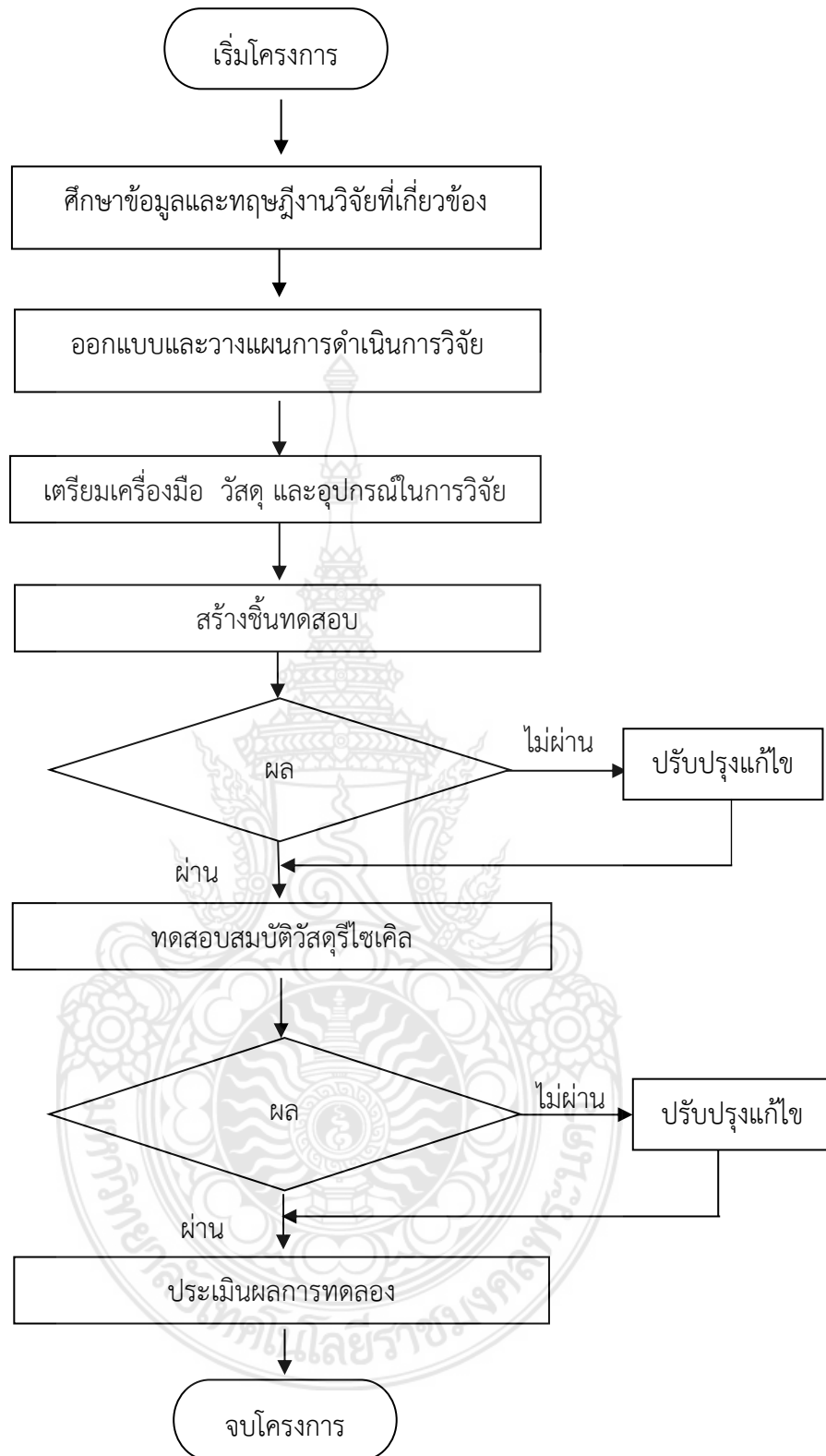
การวางแผนงานนั้น เป็นการกำหนดลำดับขั้นตอนการทำงานได้นำไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ มีระยะดำเนินงานที่เหมาะสมกับการจัดทำโครงการ โดยได้วางแผนการดำเนินงานออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงานโดยจัดลำดับขั้นตอนการทดสอบวัสดุผงหลังคากาววัสดุรีไซเคิล จะต้องมีการวางแผนและจัดลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อให้การทำงานดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

- 3.1.1 ศึกษาข้อมูลของแผนงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหลังคารีไซเคิล
- 3.1.2 วิเคราะห์สาเหตุของการทดสอบหลังคารีไซเคิล
- 3.1.3 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 3.1.4 ทำการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ
- 3.1.5 ทำการการทดสอบสมบัติของวัสดุรีไซเคิล
- 3.1.6 วิเคราะห์ ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง
- 3.1.7 สร้างผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคากาววัสดุรีไซเคิล

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

ลำดับ	รายการ	ปี 2559			ปี 2560									
		ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	เมย.	พค.	มิย.	กค.	สค.	กย.	
1	ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆในการดำเนินงาน	←→												
2	เตรียมเครื่องมือ/เครื่องจักรและวัสดุ/อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง				←→									
3	เตรียมวัสดุจากกล่องเครื่องดื่มน้ำ UHT รีไซเคิล				←→									
4	สร้างแม่พิมพ์และขึ้นรูปแผ่นทดสอบ					←→								
5	ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ						←→							
5	ทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ							←→						
6	ประเมินผลการทดลอง								←→					
7	ออกแบบผลิตภัณฑ์จากวัสดุกล่องเครื่องดื่มน้ำ UHT รีไซเคิล									←→				
8	สร้างแม่แบบและขึ้นรูปแผ่นหลังคา									←→				
9	ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคา จากกล่องเครื่องดื่มน้ำ UHT รีไซเคิล										←→			
10	สรุปและปิดโครงการวิจัย												←→	



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแผ่นมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล

3.2 การเตรียมการ

ผู้จัดทำโครงการจึงได้มีแนวคิดที่นำกล่อง UHT ที่เหลือจากการบริโภคเป็นจำนวนมากทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและทางด้านกายภาพ ที่เปลี่ยนแปลงไปของคอมโพสิต ว่ามีการใช้งานได้ประสิทธิภาพอย่างไร การใช้ลูมินีเยมพอยล์และพลาสติกสามารถนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ได้และยังสามารถช่วยลดปริมาณขยะที่มีเป็นจำนวนมากให้ลดลงได้ เพื่อนำมาใช้ในกาทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นมุงหลังคาที่ทำจากวัสดุรีไซเคิลนี้ทั้งทางกลและกายภาพโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติในการอัดร้อน 180 องศาเซลเซียส ในขนาดลูมินีเยมพอยล์และแรงอัดที่แตกต่างกัน

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแผ่นมุงหลังคาที่ทำจากวัสดุรีไซเคิล

3.2.1.1 เครื่องแยกเยื่อกระดาษกับลูมินีเยมพอยล์



รูปที่ 3.2 เครื่องแยกเยื่อกระดาษกับลูมินีเยมพอยล์

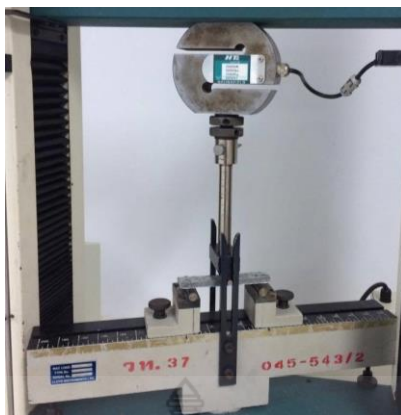
3.2.1.2 เครื่องเลื่อยวงเดือนสำหรับตัดชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดมาตรฐาน



รูปที่ 3.3 เลื่อยวงเดือน

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2.1 เครื่องทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test) หลักการทดสอบการดัดโค้ง ใช้วิธีได้ก็ ได้ในการดัดชิ้นวัสดุทดสอบซึ่งอาจจะมีหน้าตัดเป็นวงกลม, สี่เหลี่ยม หรือรูปทรงหลายเหลี่ยม ให้ได้รัศมี ความโค้งตามที่กำหนดไว้ หรือให้ได้มุมตามที่กำหนด โดยทิศทางของแรงที่ใช้ในการดัดโค้งต้องคงที่ และ ในการให้แรงในการดัดโค้งต้องเป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการคาดเคลื่อนของชิ้นทดสอบ โดยทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D790 ยี่ห้อของเครื่องคือ Nistron รุ่น 4466H1977



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการดัดโค้ง

3.2.2.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) วิธีการทดสอบค่าแรงดึง (Tensile Strength) ในการทดสอบค่าความต้านแรงดึงของงานวิจัยนี้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638 ขนาดไม่น้อยกว่า 19 × 165 × 5 มม. โดยการดึงให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน ยี่ห้อของเครื่องคือ Universal Testing Machine ใช้สำหรับทดสอบหาสมบัติการทดสอบแรงดึง 0-20,000 KN



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.2.2.3 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact Test) วิธีการทดสอบค่าการต้านแรงกระแทก โดยการตีชิ้นงานทดสอบเพียงครั้งเดียวเหวี่ยงให้หักภายใต้ภาวะที่กำหนด ชิ้นงานทดสอบต้องทำรอยบาก และลักษณะกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D7 136 ชิ้นทดสอบต้องทำเป็นร่องบากตัววีตรงกลาง โดยการจับยึดชิ้นทดสอบให้แน่น



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

3.2.2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Test) วิธีการทดสอบค่าความแข็ง ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 2240 เครื่องที่ใช้ทดสอบ Durometer Shore D แบบเข็มส่วนปลายน้ำหนักกด 5 กิโลกรัม



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง แบบ Shore D

3.2.2.5 เครื่องวัดความหนาแน่น (Density) ของวัสดุทั้งของแข็งและของเหลวทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 792 ยี่ห้อ Densimeter รุ่น m-300y



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความหนาแน่น

3.2.2.6 เครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน (Thermal Resistance and Thermal Conductivity) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C518 ยี่ห้อ Hioki Heat Flow Logger LR 8432



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน

3.3 การออกแบบการทดลอง

การดำเนินงานในการทดลองต้องคำนึงถึงการรับแรงทางกลและกายภาพได้แก่ การทดสอบการตัดโค้ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบการพองตัว การทดสอบความหนาแน่น และการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อนเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ ในส่วนของการออกแบบการทดลองนี้ จะนำเอากล่อง UHT ที่ย่อยแล้วที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด มาอัดขึ้นรูปด้วยการอัดที่ต่างกัน 3 แรงอัด คือ 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ แล้วทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ 8 ชนิด คือ การทดสอบการตัดโค้ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง การทดสอบการดูดซึมน้ำ การพองตัว การทดสอบความหนาแน่น และการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบหาสมบัติ ทำการวิเคราะห์และบันทึกผล

3.3.1 การทดสอบการตัดโค้ง (Bending Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลางและละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด 20 x 100 x 5 มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบการตัดโค้ง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 790 โดยมีระยะรองรับ 80 มิลลิเมตร มีน้ำหนักกด 10 กิโลนิวตัน และมีความเร็วในการกด 14 มิลลิเมตรต่อนาที อ่านค่าและบันทึกผล

3.3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง(Tensile Strength Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด 19 x 165 x 5 มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638 จะทำการยึดจับผิวชิ้นงานทั้งบนและล่าง จากนั้นเครื่องทดสอบทำการดึงจนขาดกลาง อ่านค่าและบันทึกผล

3.3.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลางและละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด 13 x 64 x 5 มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบการทนต่อแรงกระแทกตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 7136 คำนวณและบันทึกผล

3.3.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลางและละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น มาทำการกวดวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง โดยทำการทดสอบ 3 ตำแหน่ง ต่อ ชิ้นทดสอบ ซึ่งมีขนาด $50 \times 50 \times 5$ มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็งจะทำการเลือกใช้การทดสอบแบบ Shore D แบบเข็มส่วนปลาย น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 อ่านค่าและบันทึกผล

3.3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ โดยการทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มิลลิเมตร การแช่น้ำจะทำการชั่งน้ำหนักและความหนา ก่อนการทดสอบ จากนั้นนำไปแช่น้ำ โดยให้ห่างจากผิวน้ำ 25 มิลลิเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 แล้วบันทึกผลการทดสอบ

3.3.6 การทดสอบการพองตัว (Thickness Swelling Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และละเอียด ที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ โดยการทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มิลลิเมตร การแช่น้ำจะทำการชั่งน้ำหนักและความหนา ก่อนการทดสอบ จากนั้นนำไปแช่น้ำ โดยให้ห่างจากผิวน้ำ 25 มิลลิเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาวัดความหนาหลังการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D 570 บันทึกผลการทดสอบ

3.3.7 การทดสอบความหนาแน่น (Density Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และ ละเอียด ที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความหนาแน่นจะทำการชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 792 อ่านค่าและบันทึกผล

3.3.8 การทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน (Thermal Resistance and Thermal Conductivity Test) นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลางและละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์ , 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น ขนาด $100 \times 100 \times 5$ มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C518 อ่านค่าและบันทึกผล

การศึกษาและพัฒนาแผ่นมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล ในโครงการนี้ ขั้นตอนการปฏิบัติงานของการดำเนินโครงการจะกล่าวมาตั้งแต่การวางแผน การออกแบบการทดลอง การเตรียมวัสดุสำหรับจัดทำชิ้นงานทดสอบ การดำเนินการสร้าง และการทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ โดยทำการ ทดสอบการดัดโค้ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบการพองตัว การทดสอบความหนาแน่น และการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน ได้นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมบัติและบันทึกผล จากนั้นทำการประเมินผลและวิเคราะห์สรุปผลการทดลองเพื่อนำวัสดุรีไซเคิลที่มีสมบัติเหมาะสมไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แผ่นมุงหลังคา

3.4 การดำเนินงาน

กระบวนการการผลิตแผ่นหลังคาจากวัสดุรีไซเคิลทำได้จากการนำกล่องเครื่องดื่ม UHT มาทำการตัดแยกโดยการปั่นแยกเอาเยื่อกระดาษที่เคลือบอยู่ด้านนอกออกให้คงเหลือแต่อลูมิเนียมพอยล์กับพอลิเมอร์ที่เคลือบอัดอยู่ด้วยกัน ด้วยเครื่องแยกเยื่อกระดาษโดยใช้วิธีการปั่น ซึ่งวัสดุที่ทางผู้ดำเนินโครงการวิจัยจะเลือกใช้ในการทดลองคืออลูมิเนียมพอยล์ที่รวมอยู่กับพอลิเมอร์ที่ได้จากกล่องเครื่องดื่ม UHT โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงการดังนี้

3.4.1 การเตรียมวัสดุจากการนำกล่องเครื่องดื่ม UHT มาทำความสะอาดโดยการแกะล้างกล่องเครื่องดื่มให้สะอาด มีขั้นตอนดังนี้

- 1) จัดหากกล่อง UHT มาทำความสะอาดหลังจากนั้น นำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 การนำกล่องนมที่ทำความสะอาด มาแช่น้ำ

- 2) จากนั้นนำเข้าเครื่องปั่นเพื่อแยกเยื่อกระดาษออกโดยปั่นให้ละเอียดเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.11 การปั่นเยื่อกระดาษออกจากกล่องนม

- 3) ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมพอยล์จะออกมาจากทางออกของเครื่องตัดแยก



รูปที่ 3.12 อลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากการปั่นแยกเยื่อกระดาษ

- 4) นำอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากการปั่นไปทำการลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียด



รูปที่ 3.13 การบดย่อยอลูมิเนียมฟอยล์ที่ตากจนแห้ง

5) ทำการคัดแยกขนาดอลูมิเนียมฟอยล์ ก่อนนำไปยังขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไป



(a) หยาบ

(b) ปานกลาง

(c) ละเอียด

รูปที่ 3.14 ขึ้นอลูมิเนียมฟอยล์



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.15 ขนาดชั้นอลูมิเนียมฟอยล์ที่ใช้ทดลอง

3.4.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ เป็นขั้นตอนการดำเนินงานเกี่ยวกับการจัดทำขึ้นทดสอบจากวัสดุรีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดได้เป็นชิ้นส่วนอลูมิเนียมฟอยล์ผสมพอลิเมอร์เรียบร้อยแล้ว นำมาอัดด้วยความร้อนขึ้นรูปเป็นแผ่นเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำแม่แบบสำหรับอัดชิ้นงาน โดยกัดด้วยเครื่อง CNC ขนาด $130 \times 130 \times 8$ มิลลิเมตร

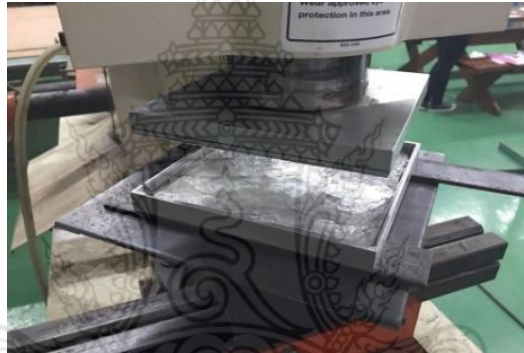


รูปที่ 3.16 แม่แบบอัดชิ้นงาน

2) อัดขึ้นรูปแผ่นทดสอบ นำอลูมิเนียมฟอยล์แต่ละขนาดที่จะทำการอัดขึ้นรูปมาใส่ในบล็อกรับน้ำหนัก 150 กรัม นำไปอบในเตาอบด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วย แรงอัด 6 บาร์ ,8 บาร์ และ 10 บาร์ แล้วปล่อยให้เย็นตัว ก็จะได้แผ่นวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิล



รูปที่ 3.17 การอบอลูมิเนียมฟอยล์ในเตาอบ




รูปที่ 3.18 การอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 3.19 แผ่นวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิลจากการอัดขึ้นรูป

3) ตัดชิ้นงานทดสอบและขึ้นรูปตามขนาดที่กำหนด

ตารางที่ 3. 2 ขนาดชิ้นงานทดสอบ

ลำดับ	การทดสอบ	จำนวนชิ้น	ขนาด(มม.)	ขนาดขึ้นทดสอบ
1	การทดสอบการตัดโค้ง	45	20x115x5	

2	การทดสอบแรงดึง	45	19×165×5	
3	การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก	45	13×64×5	
4	การทดสอบความแข็ง, การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบการพองตัว	90	50×50×5	
5	การทดสอบความหนาแน่น	45	5×5×5	
6	การทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน	45	100×100×5	

3.4.3 ทดสอบสมบัติทางกล

3.4.3.1 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมฟอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และ ละเอียด ที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ไปทำการทดสอบการดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ตามลำดับ โดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น โดยมีระยะห่างฐานรองรับ 80 มิลลิเมตร มีน้ำหนักกด 10 กิโลนิวตัน และมีความเร็วในการกด 14 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่อง ทดสอบแรงดัด ยี่ห้อ Nistron รุ่น 4466H1977 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- 1) นำชิ้นงานใส่เครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบ



รูปที่ 3.20 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดัด

2) เริ่มทำการดัดชิ้นงาน โดยมีความยาวช่วงพาด 80 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างฐานรองรับ 80 มิลลิเมตร มีน้ำหนักกด 10 กิโลนิวตัน และมีความเร็วในการกด 14 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.21 การดัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.22 การดัดชิ้นงานชิ้นงานจนแตกหัก

3) ชิ้นงานภายหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.23 ชิ้นงานหลังการทดสอบการดัดโค้ง

4) อ่านค่าและทำการบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก.1

3.4.3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง(Tensile Strength Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมฟอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 638 จะทำการยึดจับผิวชิ้นงานทั้งบนและล่าง จากนั้นเครื่องทดสอบทำการดึงจนขาดกลาง โดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น ยี่ห้อของเครื่องคือ Universal Testing Machine มีวิธีการดังนี้

1) นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบ โดยจะทำการยึดจับผิวชิ้นงานทั้งบนและล่าง จากนั้นเครื่องทดสอบทำการดึงชิ้นงานจนขาดออกจากกัน



รูปที่ 3.24 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง

2) ทำการเริ่มดึงชิ้นงาน



รูปที่ 3.25 การดึงชิ้นงานทดสอบ

3) ทำการดึงชิ้นงานจนชิ้นงานขาดออกจากกัน



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานทดสอบขาดขณะทดสอบ

4) ชิ้นงานทดสอบภายหลังการทดสอบ

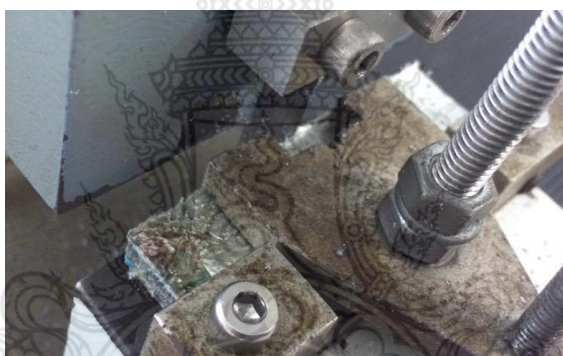


รูปที่ 3.27 ชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง

5) อ่านค่าและทำการบันทึกผลในตาราง ภาคผนวก ก.2

3.4.3.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ตามมาตรฐาน ASTM D7136 โดยการตีชิ้นงานทดสอบด้านเดียวกับรอยบากเพียงครั้งเดียว ชิ้นงานทดสอบต้องทำรอยบากร่องวีตรงกลาง และการจับยึดชิ้นทดสอบให้แน่น โดยจะทำการทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1) ทำการบากชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.28 การบากชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.29 ชิ้นงานที่บากเรียบร้อยแล้ว

2) จับชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบโดยการตีชิ้นงานทดสอบเพียงครั้งเดียว การเหวี่ยงของค้อนตีชิ้นงานจะเหวี่ยงตีจากด้านหน้ารอยบากของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.30 การจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงกระแทก

3) ชิ้นงานหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.31 ชิ้นงานหลังจากการตีทดสอบ

4) อ่านค่าและทำการบันทึกผลดังตารางในภาคผนวก ก.3

3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties Testing)

3.4.4.1 การทดสอบความแข็ง(Hardness Test) นำชิ้นทดสอบอลูมิเนียมพอยล์ขนาด หนา 1 มม. ยาว 10 มม. ละเอียด ที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ชนิดละ 5 ชิ้น มาทำการทดสอบโดย เครื่องทดสอบความแข็ง ชี้นละ 3 จุด ทำการทดสอบโดยเลือกใช้การทดสอบแบบ Shore D แบบเข็มส่วน ปลาย เครื่องที่ใช้ทดสอบ Durometer Shore D น้ำหนักกด 5 kg. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 มีวิธีการดังนี้

1) นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแบบ Shore D ใช้หัวกดเป็นแบบเข็ม น้ำหนักกด 5 kg. โดยจะทำการกดทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ต่อ ชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.32 การจับชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.33 การทดสอบความแข็งแรงชิ้นงาน

2) อ่านค่าและบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก.5

3.4.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ(Water Absorption Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมฟอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ไปทำการทดสอบด้วยการทดสอบดูดซึมน้ำ โดยจะทดสอบชนิดละ 5 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 570 โดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำ มีวิธีการดังนี้

1) ชั่งน้ำหนักก่อนทำการแช่น้ำ



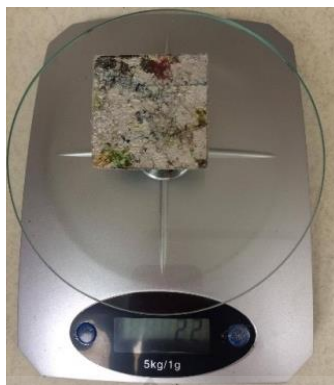
รูปที่ 3.34 การชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ

2) นำชิ้นงานไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.35 การแช่ชิ้นงานในน้ำ

3) ชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำ โดยการนำชิ้นงานที่แช่น้ำตามเวลาที่กำหนดแล้วมาทำให้ผิวแห้งแล้วนำไปทำการชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3.36 การชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ

4) อ่านค่าและทำการบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก.7

3.4.4.3 การทดสอบการพองตัว(Thickness Swelling Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ไปทำการทดสอบการพองตัวโดยทำการวัดความหนาชิ้นทดสอบก่อนและหลังการแช่น้ำ โดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 570 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1) วัดความหนาของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ



รูปที่ 3.37 การวัดขนาดชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ

2) นำชิ้นงานไปทดสอบโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.38 การแช่ชิ้นงานในน้ำ

3) วัดความหนาชิ้นทดสอบหลังการแช่น้ำ



รูปที่ 3.39 การวัดขนาดชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ

4) อ่านค่าและทำการบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก.9

3.4.4.4 การทดสอบความหนาแน่น(Density Test) นำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่นโดยการวัดค่าความหนาแน่นในอากาศและในน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D 792 โดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น เครื่องทดสอบที่ใช้ชื่อ Densimeter รุ่น m-300y ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1) ทำการเซ็ตเครื่อง



รูปที่ 3.40 การเซ็ตเครื่องทดสอบ

2) นำชิ้นงานมาใส่ตะแกรงเพื่อชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ



รูปที่ 3.41 ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบในอากาศ



รูปที่ 3.42 ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบในน้ำ

3) อ่านค่าและทำการบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก.11

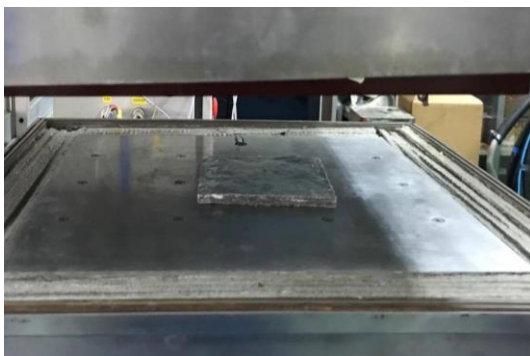
3.4.4.5 การทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน(Thermal Resistance and Thermal Conductivity Test) นำขึ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM C 518 โดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 5 ชิ้น เครื่องทดสอบยี่ห้อ Hioki Heat Flow Logger LR8432 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- 1) ทำการเช็คเครื่องก่อนทำการทดสอบ ตั้งค่าโปรแกรมบนจอควบคุมแล้วนำชิ้นงานใส่เข้าเครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบโดยจะคำนวณผลให้โดยอัตโนมัติ



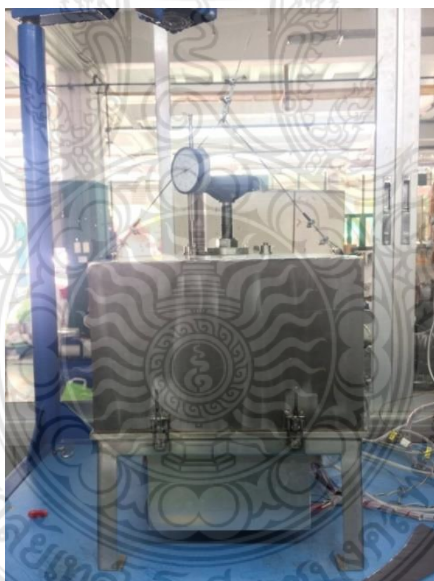
รูปที่ 3.43 การเช็คเครื่องทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน

- 2) นำชิ้นงานทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบ โดยวางชิ้นงานบนแผ่นตัวให้ความร้อนของเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.44 การนำชิ้นงานเข้าเครื่องวัดความร้อน

3) จากนั้นทำการปิดฝาเครื่องทดสอบและล็อคให้สนิททั้ง 4 ข้าง ของปากกาจับเครื่องทดสอบ และเริ่มทำการทดสอบ



รูปที่ 3.45 การทดสอบการนำความร้อนชิ้นงาน

4) การนำความร้อนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ ของพลังงานความร้อนบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อหาค่าการนำความร้อน และบันทึกผลทดสอบในภาคผนวก ก. 13 และ ก.14



รูปที่ 3.46 จอแสดงข้อมูลการทดสอบการนำความร้อน

3.5 การผลิตวัสดุผนังหลังคา

จากการดำเนินการศึกษาสมบัติของคอมโพสิต สามารถทราบถึงสมบัติที่ดีที่สุดของอลูมิเนียมพอยล์ 3 ขนาด ได้แก่ หยาบ ปานกลาง และละเอียดที่แรงอัด 6 บาร์, 8 บาร์ และ 10 บาร์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดและทำการสรุปผลการเลือกขนาดของอลูมิเนียมพอยล์เพื่อทำวัสดุผนังหลังคาแผ่นลอน โดยจะผลิต ขนาด 0.99 x 2.40 เมตร จำนวน 10 แผ่น

วิเคราะห์ข้อมูลและเลือกขนาดอลูมิเนียมพอยล์เพื่อนำไปผลิตวัสดุผนังหลังคาจากข้อมูลที่ได้จากผลทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพจากการเปรียบเทียบขนาดอลูมิเนียมพอยล์ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดและทำการสรุปผลการเลือกขนาดอลูมิเนียมพอยล์เพื่อนำไปผลิตวัสดุผนังหลังคา จากอลูมิเนียมพอยล์ของกล่องเครื่องต้ม UHT รีไซเคิล



รูปที่ 3.47 แผ่นหลังคาลอนใหญ่ ขนาด กว้าง 99 ซม. ยาว 240 ซม. หนา 5 ซม.

หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดและทำการสรุปผลเพื่อเลือกวัสดุจากการทดลองที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับทำผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคา แล้วนำไปจัดทำเป็นวัสดุแผ่นหลังคาขนาด กว้าง 99 ซม. ยาว 240 ซม. หนา 5 ซม. จำนวน 10 แผ่น จากวัสดุที่ทำการทดลอง โดยมีขั้นตอนการผลิตแผ่นหลังคาดังภาคผนวก ค.

การศึกษาสมบัติคอมโพสิตในโครงการวิจัยนี้ ขั้นตอนการปฏิบัติงานของการดำเนินงานโครงการ จะกล่าวมาตั้งแต่การวางแผน การออกแบบการทดลอง การเตรียมวัสดุจัดทำชิ้นงานทดสอบ การดำเนินการสร้างและทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ โดยทำการ ทดสอบการตัดโค้ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบการพองตัว การทดสอบความหนาแน่น และการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำ

ความร้อน นำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบสมบัติและบันทึกผล จากนั้นทำการประเมินผลและวิเคราะห์สรุปผล เกี่ยวกับขนาดของอนุภาคนิเยมฟอยล์ กับ แรงดันในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นหลังคา



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานทดสอบในบทที่ 3 ซึ่งคณะผู้จัดทำโครงการได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุทดสอบระหว่างอลูมิเนียมพอยล์ขนาด หยาบ ปานกลาง และละเอียด ด้วยแรงอัดที่ 6 บาร์ 8 บาร์ และ 10 บาร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบสมบัติทดสอบการตัดโค้ง ทดสอบแรงดึง การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก ทดสอบความแข็ง ทดสอบการดูดซึมน้ำ ทดสอบการพองตัว ทดสอบความหนาแน่นและทดสอบความเป็นฉนวน ด้วยเครื่องทดสอบจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและสรุปผลดังต่อไปนี้

4.1 การประเมินผลการทดสอบการตัดโค้ง จากการทดลองนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ หยาบ ปานกลาง และละเอียดไปทำการทดสอบการตัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบแรงตัด ใช้น้ำหนักโหลด 10 KN ความเร็วในการกด 14 มม./นาที ระยะห่างฐานรองรับ 80 มม. ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการตัดโค้ง

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความต้านทานแรงตัดโค้ง (MPa)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	20.39	18.78	19.89	15.89	17.89	18.57
	8	20.38	16.03	16.62	19.82	18.65	18.30
	10	17.57	20.04	18.25	15.96	19.32	18.23
ปานกลาง	6	20.20	19.56	16.79	18.25	17.88	18.54
	8	18.37	19.23	15.32	20.38	16.65	17.99
	10	19.98	14.98	16.32	15.79	18.26	17.07
ละเอียด	6	15.52	18.41	19.95	16.38	19.79	18.01
	8	14.39	20.93	18.41	14.99	16.89	17.12
	10	16.10	15.69	12.19	17.59	13.95	15.10

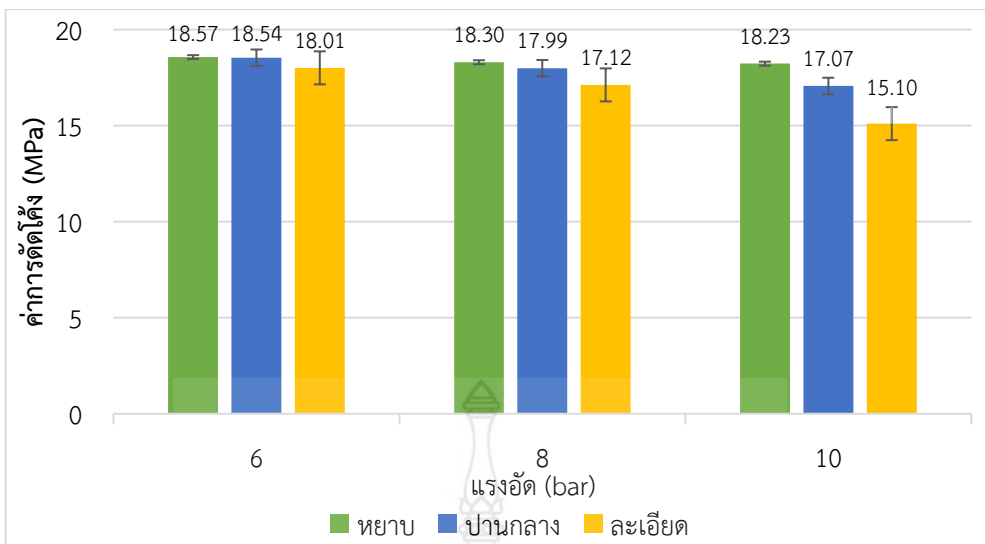
$$\text{สูตร } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบแรงตัดโค้ง

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบแรงตัดโค้ง

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{20.39+18.78+19.89+15.89+17.89}{5} = 18.568 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าแรงตัดโค้งของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 18.568 MPa



รูปที่ 4.1 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตัดโค้ง แรงอัด และขนาดของออลูมิเนียมพอยล์

4.2 การประเมินผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง จากการทดลองนำชิ้นทดสอบจากออลูมิเนียมพอยล์ ยหยาบ ปานกลาง และละเอียดย ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยดึงด้านผิวหน้าของทั้ง 2 ด้านจนฉีกขาดออกจากกัน ตามมาตรฐาน ASTM D 683 ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
ยหยาบ	6	7.768	10.610	9.096	11.162	10.950	9.92
	8	7.037	10.982	10.899	10.806	9.952	9.94
	10	10.498	10.621	9.228	11.718	11.255	10.66
ปานกลาง	6	9.792	8.045	8.636	10.122	10.354	9.38
	8	9.865	10.460	9.240	10.392	10.282	10.05
	10	10.128	9.285	10.481	10.742	9.895	10.11
ละเอียดย	6	10.160	8.075	10.534	10.260	9.682	9.74
	8	10.786	8.002	11.158	10.123	11.474	10.31
	10	9.363	10.623	10.766	10.714	10.543	10.40

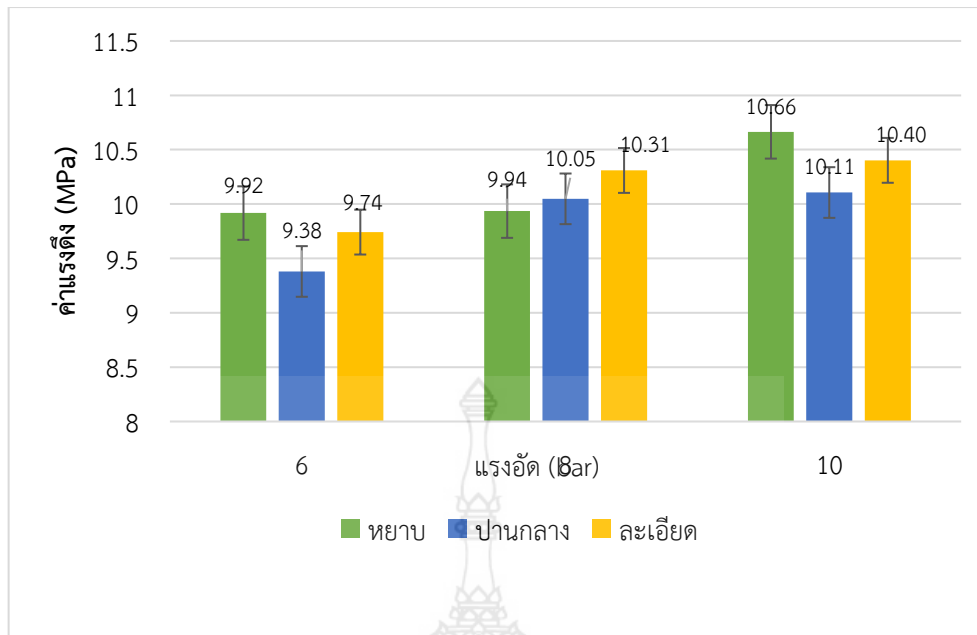
$$\text{สูตร } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบแรงดึง

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบแรงดึง

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{7.768+10.610+9.096+11.162+10.950}{5} = 9.917 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าแรงดึงของชิ้นงานจากออลูมิเนียมพอยล์ชนิดยหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 9.917 MPa



รูปที่ 4.2 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึง แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

4.3 การประเมินผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก จากการทดลองนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ หยาบ ปานกลาง และละเอียดไปทำการทดสอบในการทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Test) ทำได้โดยการตีชิ้นทดสอบเพียงด้านเดียว ชิ้นทดสอบต้องทำรอยบากที่มีขนาดและลักษณะกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D7136 ชิ้นทดสอบต้องทำเป็นร่องบากตัววีตรงกลาง จับชิ้นทดสอบให้แน่นจัดให้รอยบากอยู่ตรงกลางและมีทิศทางเดียวกับค้อนที่เหวี่ยงลงมากระแทก ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	แรงกระแทก (J/m ²)					\bar{x}
		ขั้นที่ 1	ขั้นที่ 2	ขั้นที่ 3	ขั้นที่ 4	ขั้นที่ 5	
หยาบ	6	97.208	101.155	102.295	100.334	102.865	100.77
	8	106.822	103.142	110.348	121.520	109.452	110.26
	10	106.176	104.808	115.139	118.546	110.264	110.99
ปานกลาง	6	105.331	110.101	103.895	100.099	106.879	105.26
	8	100.099	100.776	111.211	117.591	112.878	108.51
	10	111.516	98.578	116.209	106.257	112.351	108.98
ละเอียด	6	100.062	102.402	104.375	108.062	106.207	104.22
	8	104.061	110.961	101.957	114.156	110.080	108.24
	10	112.619	110.365	108.030	101.288	111.450	108.75

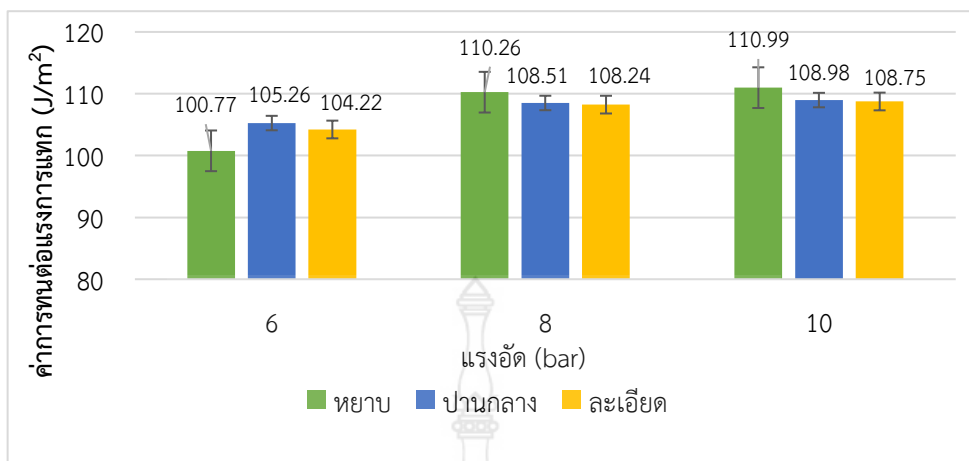
$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{97.208+101.155+102.295+100.334+102.865}{5} = 100.771 \text{ J/m}^2$$

เพราะฉะนั้น ค่าการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 100.771 J/m²



รูปที่ 4.3 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงกระแทก แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

4.4 การประเมินผลการทดสอบความแข็ง จากการทดสอบโดยการนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์หยาบ ปานกลาง ละเอียด ชนิดละ 5 ชิ้น ชิ้นละ 3 จุด ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็งจะทำการเลือกใช้การทดสอบแบบ Shore D น้ำหนักกด 5 kg. ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.6

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็ง

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความแข็ง (Shore-D)					\bar{x}
		ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	
หยาบ	6	47	49	51	52	51	50.00
	8	48	64	48	51	51	50.40
	10	52	51	51	53	55	52.40
ปานกลาง	6	51	51	49	46	49	49.20
	8	52	50	52	53	53	52.00
	10	50	47	54	50	52	50.60
ละเอียด	6	51	48	54	46	50	49.80
	8	51	52	54	54	53	52.80
	10	55	54	51	51	52	52.60

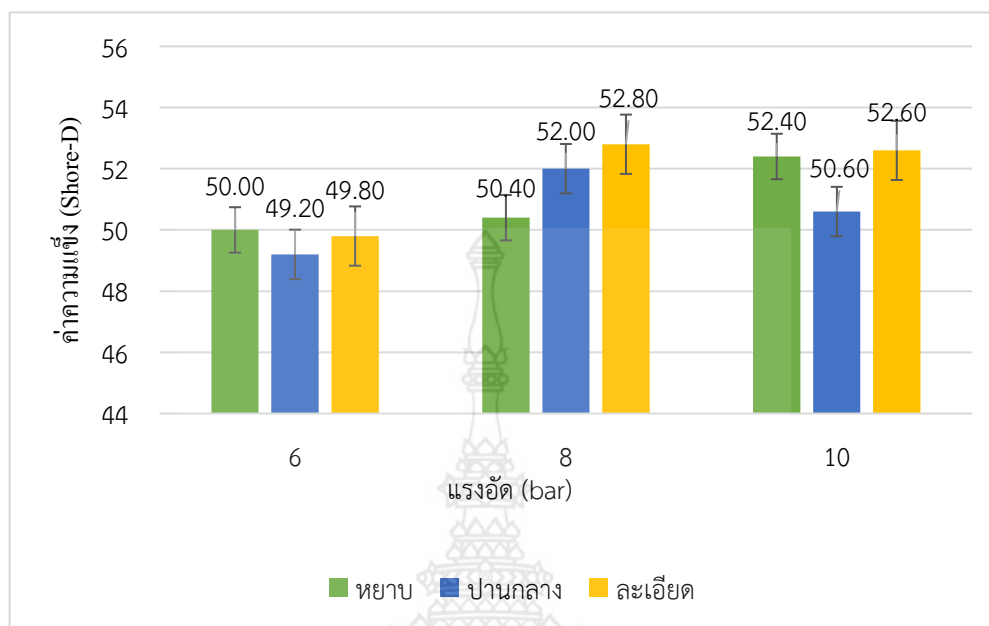
$$\text{สูตร } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบความแข็ง

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบความแข็ง

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{47+49+51+52+51}{5} = 50.00 \text{ Shore-D}$$

เพราะฉะนั้น ค่าความแข็งของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 50.00 Shore-D



รูปที่ 4.4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมฟอยล์

4.5 การประเมินผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมฟอยล์ หยาบ ปานกลาง และละเอียด ไปทำการทดสอบโดยวิธีการแช่น้ำ โดยก่อนการทดสอบจะวัดน้ำหนักก่อนการแช่น้ำ แล้วจึงนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดน้ำหนักหลังการแช่น้ำ และทำการคำนวณ ตามมาตรฐาน ASTM D 570 ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.8

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การดูดซึมน้ำ (%)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.82	0.82	0.86	0.73	0.73	0.79
	8	0.68	0.73	0.73	0.75	0.68	0.71
	10	0.62	0.63	0.68	0.57	0.58	0.62
ปานกลาง	6	0.58	0.58	0.58	0.63	0.53	0.58
	8	0.59	0.50	0.59	0.55	0.55	0.56
	10	0.48	0.53	0.53	0.58	0.53	0.53
ละเอียด	6	0.30	0.31	0.35	0.34	0.30	0.32
	8	0.30	0.31	0.34	0.30	0.31	0.31
	10	0.26	0.21	0.22	0.26	0.26	0.24

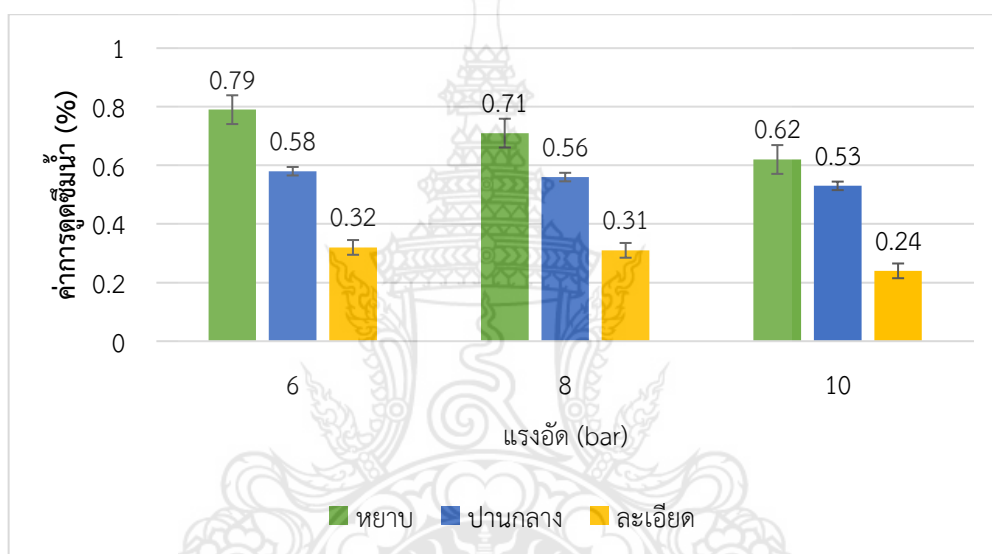
$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.82+0.82+0.86+0.73+0.73}{5} = 0.79 \%$$

เพราะฉะนั้น ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 0.79 %



รูปที่ 4.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

4.6 การประเมินผลการทดสอบการพองตัว จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์

หยาบ ปานกลาง และละเอียด ไปทำการทดสอบโดยวิธีการแช่น้ำ โดยก่อนการทดสอบจะวัดความหนา ก่อนการแช่น้ำ แล้วจึงนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความหนาหลังการแช่น้ำ และทำการคำนวณ ตามมาตรฐาน ASTM D 570 ได้ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.10

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการพองตัว

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การพองตัว (%)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.82	0.90	0.98	0.84	0.83	0.87
	8	0.84	0.83	0.90	0.86	0.88	0.86
	10	0.59	0.61	0.84	0.81	0.67	0.70
ปานกลาง	6	0.81	0.82	0.81	0.83	0.83	0.82
	8	0.66	0.66	0.90	0.84	0.83	0.78
	10	0.67	0.80	0.64	0.52	0.67	0.66
ละเอียด	6	0.65	0.85	0.67	0.69	0.67	0.71
	8	0.67	0.83	0.66	0.66	0.67	0.70

	10	0.64	0.65	0.71	0.69	0.68	0.67
--	----	------	------	------	------	------	------

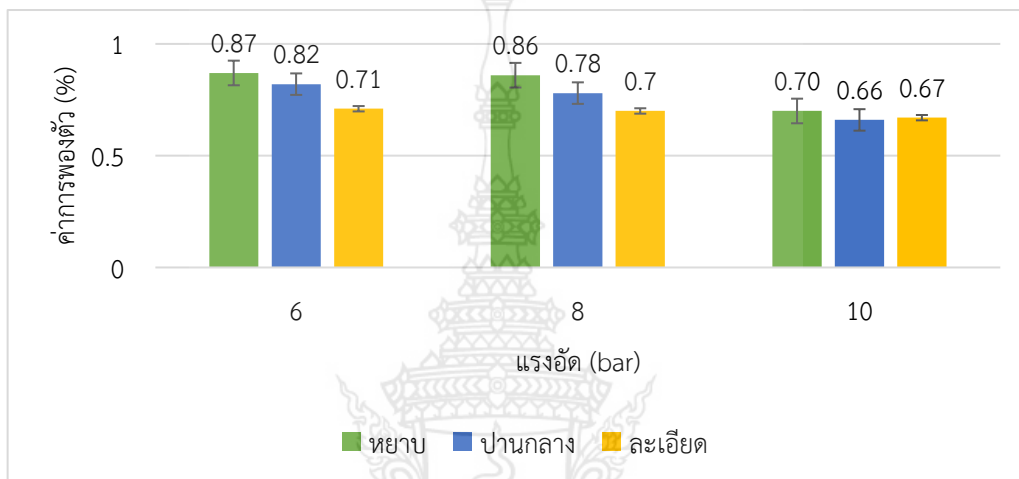
สูตร $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

x_i แทนผลการทดสอบการพองตัว

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการพองตัว

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.82+0.90+0.98+0.84+0.83}{5} = 0.87$$

เพราะฉะนั้น ค่าการพองตัวของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 0.87 %



รูปที่ 4.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการพองตัว แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

4.7 การประเมินผลการทดสอบความหนาแน่น จากการทดลองนำชิ้นทดสอบจากอลูมิเนียมพอยล์ขนาดหยาบ ปานกลาง และละเอียดไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น โดยการนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำเพื่อวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D 792 อ่านค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ได้ผลการทดสอบจากตาราง ก.12

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความหนาแน่น (g/cm ³)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	1.0538	1.0658	1.0640	1.0699	1.0642	1.064
	8	1.0754	1.0746	1.0755	1.0734	1.0659	1.073
	10	1.0876	1.0899	1.0930	1.0691	1.0911	1.086
ปานกลาง	6	1.0604	1.0743	1.0598	1.0642	1.0569	1.063
	8	1.0728	1.0810	1.0434	1.0644	1.0627	1.065
	10	1.0650	1.0716	1.0738	1.0724	1.0611	1.069
ละเอียด	6	1.0968	1.0661	1.0699	1.0835	1.0619	1.076
	8	1.0796	1.0709	1.0830	1.0816	1.0763	1.078
	10	1.0850	1.0860	1.0821	1.0813	1.0987	1.087

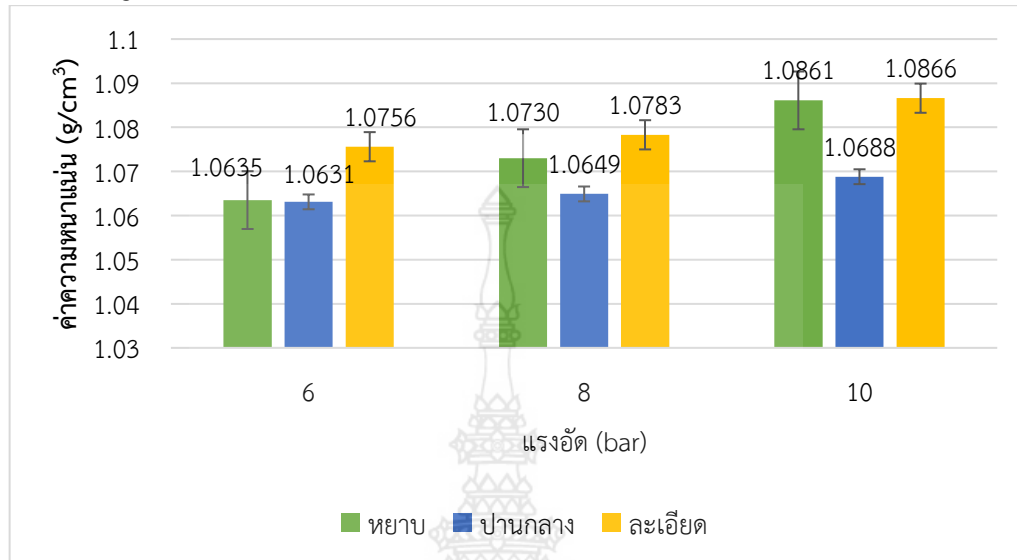
สูตร $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

x_i แทนผลการทดสอบความหนาแน่น

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบความหนาแน่น

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{1.0538+1.0658+1.0604+1.0699+1.0642}{5} = 1.0635 \text{ g/cm}^3$$

เพราะฉะนั้น ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 1.0635 g/cm^3



รูปที่ 4.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

4.8 การประเมินผลการทดสอบการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน การทดสอบค่าการต้านทานความร้อนและการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เครื่องทดสอบจะทำการถ่ายเทอุณหภูมิไปยังชิ้นงานการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) สามารถเกิดขึ้นได้ 3 ทาง คือการพาความร้อน (Convection) การนำความร้อน (Conduction) การทดสอบการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) จากอลูมิเนียมพอยล์ขนาดหยาบ ปานกลาง และละเอียดเพื่อดูค่าความแตกต่างของแต่ละอัตราส่วน โดยมีหน่วยเป็น $W/(mK)$ ผลการทดสอบจากตารางภาคผนวก ก.13 และ 14

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการต้านทานความร้อน

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การต้านทานความร้อน(Thermal Resistance) ($m^2.K$) /W					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.0214	0.0229	0.0235	0.0244	0.0243	0.023
	8	0.0227	0.0228	0.0225	0.0257	0.0231	0.023
	10	0.0214	0.0258	0.0288	0.0397	0.0392	0.031
ปานกลาง	6	0.0307	0.0308	0.0245	0.0249	0.0288	0.028
	8	0.0272	0.0226	0.0248	0.0302	0.0295	0.027
	10	0.0311	0.0289	0.0298	0.0290	0.0295	0.028
ละเอียด	6	0.0366	0.0286	0.0267	0.0304	0.0339	0.031
	8	0.0235	0.0257	0.0355	0.0372	0.0328	0.031
	10	0.0385	0.0387	0.0391	0.0235	0.0288	0.034

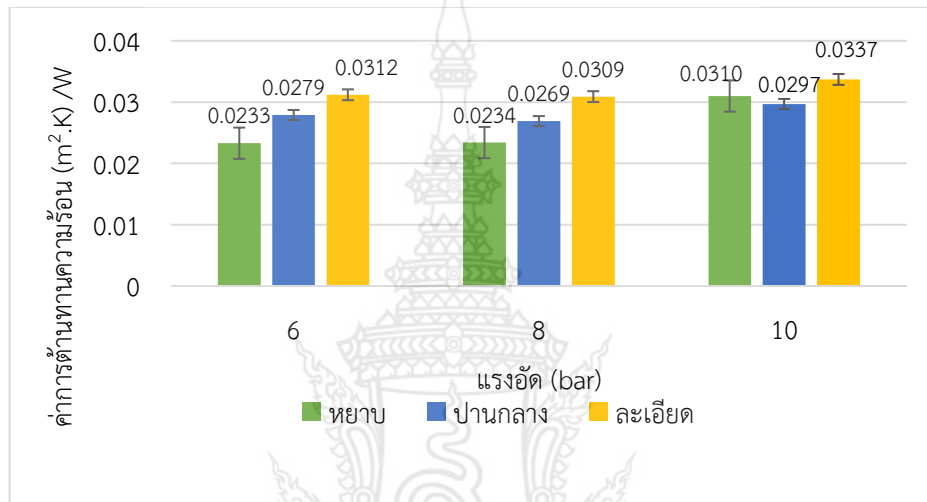
$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการต้านทานความร้อน

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการต้านทานความร้อน

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.0214+0.0229+0.0235+0.0244+0.0243}{5} = 0.0233 \text{ (m}^2\cdot\text{K) /W}$$

เพราะฉะนั้น ค่าการต้านทานความร้อนของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 0.0233 (m².K) /W



รูปที่ 4.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานความร้อน แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมพอยล์

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการนำความร้อน

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การนำความร้อน (Thermal Conductivity) W/(mK)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.2083	0.2173	0.2290	0.2304	0.2302	0.223
	8	0.2108	0.2173	0.2272	0.2298	0.2285	0.223
	10	0.2173	0.2189	0.2211	0.2198	0.2186	0.219
ปานกลาง	6	0.1667	0.1667	0.2083	0.2083	0.2076	0.192
	8	0.1852	0.2273	0.2084	0.1667	0.2174	0.201
	10	0.1889	0.1775	0.1852	0.1808	0.1868	0.184
ละเอียด	6	0.1389	0.1786	0.1923	0.1667	0.1832	0.172
	8	0.2174	0.2017	0.2124	0.1425	0.1498	0.185
	10	0.1455	0.1482	0.1488	0.2174	0.2052	0.173

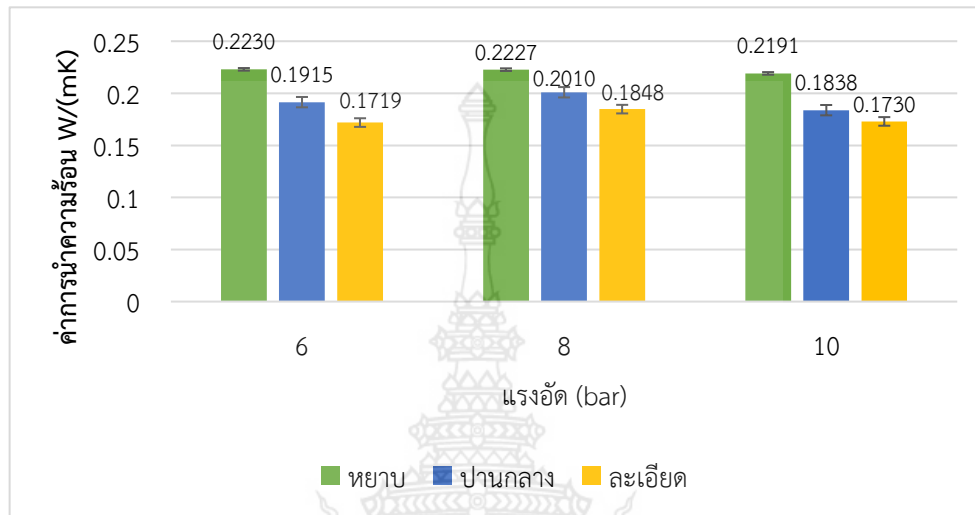
$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการนำความร้อน

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการนำความร้อน

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.0283+0.2173+0.2290+0.2304+0.2302}{5} = 0.2230 \text{ W/(mK)}$$

เพราะฉะนั้น ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์ชนิดหยาบที่แรงดัน 6 บาร์ มีค่าเท่ากับ 0.2230 W/(mK)



รูปที่ 4.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน แรงอัด และขนาดของอลูมิเนียมฟอยล์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของพลาสติกผสมจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE) กับ อลูมิเนียมฟลอยด์ ที่ได้จากการแยกเยื่อกระดาษออกจากเครื่องตี UHT รีไซเคิล เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แผ่นมุงหลังคาเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงทั้งทางกลและทางกายภาพมากขึ้น เป็นการศึกษาวิจัยในทางวิศวกรรมที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มาใช้ประโยชน์ ช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอยประเภทเครื่องตี UHT เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุรีไซเคิลจากเครื่องตี UHT ช่วยให้ชุมชนมีอาชีพและมีรายได้เสริม และช่วยลดพลังงานทางอ้อมจากการใช้วัสดุธรรมชาติและยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากผลการศึกษาและทดลองสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสมนี้สามารถสรุปผลของโครงการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุจากเครื่องตี UHT รีไซเคิล จำนวน 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และละเอียด ปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมที่มีขนาดชิ้นงานหยาบที่ใช้แรงอัดขึ้นรูป 10 bar มีสมบัติทางกลและทางกายภาพดีกว่าวัสดุผสม ที่มีชิ้นงาน ขนาดหยาบและละเอียด ที่แรงดันต่างๆ ที่ทำการทดลอง ซึ่งปรากฏว่ามีสมบัติทางกลคือ ค่าการต้านการดัดโค้ง 18.228 MPa ค่าการต้านแรงดึง 10.664 MPa ค่าการทนต่อแรงกระแทก 110.987 J/m² และ มีสมบัติทางกายภาพคือ ค่าความแข็ง 5.40 Shore-D ค่าการดูดซึมน้ำ 0.62 % ค่าการพองตัว 0.70 % ค่าความหนาแน่น 1.0861 g/m³ ค่าการต้านทานความร้อน 0.0310 m².KW ค่าการนำความร้อน 0.2191 W/mK ตามลำดับ

5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ

5.2.1 การติดต่อสื่อสารกันภายในกลุ่มมีการผิดพลาด อาจสื่อสารกันไม่เข้าใจจึงทำให้การดำเนินงานล่าช้า

5.2.2 การทดสอบล่าช้าเนื่องจากทางมหาวิทยาลัยเรานั้นไม่มีเครื่องทดสอบ จึงต้องทำการติดต่อขอใช้เครื่องจากมหาวิทยาลัยอื่นทำให้มีการรอการอนุมัติจากมหาวิทยาลัยนั้น จึงทำให้การทดสอบล่าช้า

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียมฟลอยด์นอกจากการนำมาทำเป็นหลังคาแล้ว ยังสามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้อีก อาทิ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ ผับบ้าน เรือท้องแบน เป็นต้น

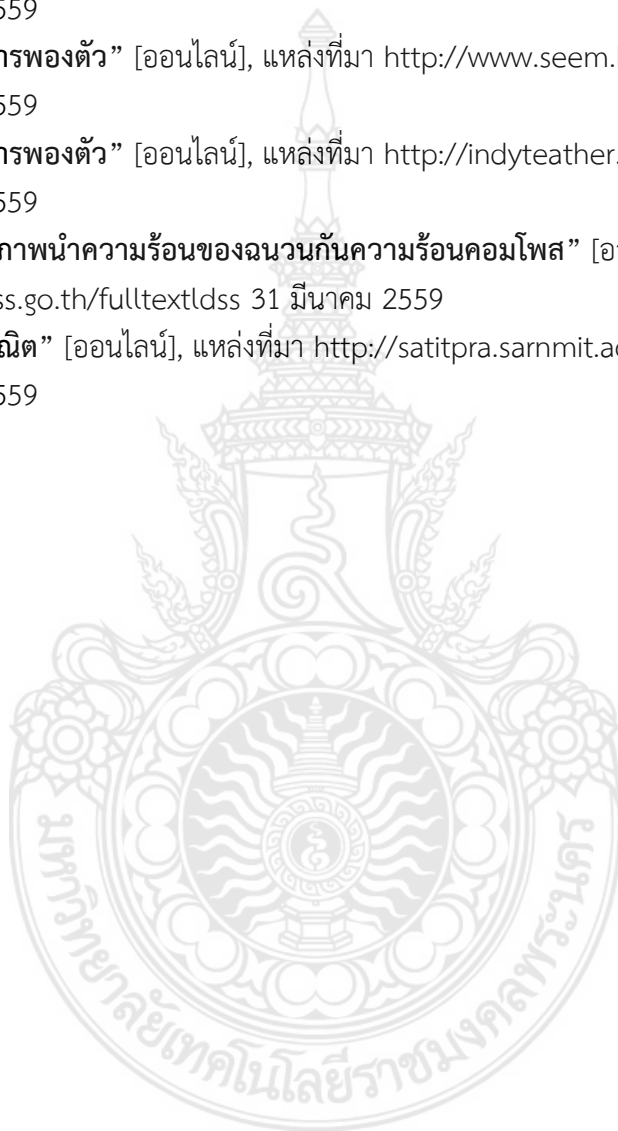
5.3.2 กระดาษที่ได้จากการแยกเยื่อนั้นสามารถนำมารีไซเคิลใหม่ได้ เช่น กระดาษรีไซเคิล กล่องผลิตภัณฑ์จากกระดาษอัด เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] “UHT (Ultra High Temperature)” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org>
29 มีนาคม 2559
- [2] “อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://unifoil-thailand.com>
30 มีนาคม 2559
- [3] “พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)” [ออนไลน์],
แหล่งที่มา <http://www.sombatnet.com> 29 มีนาคม 2559
- [4] “การอัดขึ้นรูป” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.assabth.com>
29 มีนาคม 2559
- [5] “ยอดการผลิตกล่อง (UHT)” [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.set.or.th>
29 มีนาคม 2559
- [6] “การผลิตกล่อง (UHT)” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://science.srru.ac.th>
29 มีนาคม 2559
- [7] จีราภรณ์ คาศรี “พอลิเอทิลีนกับการขึ้นรูปใหม่” 29 มีนาคม 2559
- [8] รังสิมา ชลคุปรัตน์า ต้นทเทอดธรรม และ สุชาดา อุชชิน “การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพ -
สิตของเส้นใยสับปะรดกับเอทิลีนไวไนลอะซิเตต”
สถาบันผลิตผลเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตร-ศาสตร์ 30 มีนาคม 2559
- [9] สุภัทรา บุตรทองคำ และ มุกระวี พรหมศรีชา, 2556. “การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพอลิ
เมอร์คอมพอสิตจากพอลิเอทิลีน”, ปรินูญานินพณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ 30 มีนาคม 2559
- [10] “การรีไซเคิลกล่องเครื่องดื่ม” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.tcdc.or.th>
30 มีนาคม 2559
- [11] “กล่องเครื่องดื่ม” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.ampolfood.com>
30 มีนาคม 2559
- [12] “การขึ้นรูปของพอลิเมอร์” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://epg.science.cmu.ac.th>
30 มีนาคม 2559
- [13] “กระบวนการอัด” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://epg.science.cmu.ac.th>
30 มีนาคม 2559
- [14] “การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก” [ออนไลน์], แหล่งที่มา
<http://archmis.arch.nu.ac.th> 31 มีนาคม 2559
- [15] “การทดสอบความต้านทานแรงดึง” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.seem.kmutt.ac.th>
31 มีนาคม 2559

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] “การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทก” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.j.cit.kmutnb.ac.th> 31 มีนาคม 2559
- [17] “การทดสอบความแข็ง” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.j.cit.kmutnb.ac.th> 31 มีนาคม 2559
- [18] “การดูดซึมน้ำ” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.thaicermicsociety.or.th> 31 มีนาคม 2559
- [19] “การทดสอบการพองตัว” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.seem.kmutt.ac.th> 31 มีนาคม 2559
- [20] “การทดสอบการพองตัว” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://indyteather.wordpress.com> 31 มีนาคม 2559
- [21] “การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss> 31 มีนาคม 2559
- [22] “ค่าเฉลี่ยเลขคณิต” [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://satitpra.sarnmit.ac.th> 31 มีนาคม 2559



ภาคผนวก ก.

- ผลการทดสอบการตัดโค้ง
- ผลการทดสอบแรงดึง
- ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก
- ผลการทดสอบความแข็ง
- ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ
- ผลการทดสอบการพองตัว
- ผลการทดสอบความหนาแน่น
- ผลทดสอบการต้านทานความร้อน
- ผลทดสอบการนำความร้อน
- สรุปผลการทดสอบวัสดุ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการตัดโค้ง

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การตัดโค้ง (MPa)					
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	\bar{x}
หยาบ	6	20.39	18.78	19.89	15.89	17.89	18.568
	8	20.38	16.03	16.62	19.82	18.65	18.300
	10	17.57	20.04	18.25	15.96	19.32	18.228
ปานกลาง	6	20.20	19.56	16.79	18.25	17.88	18.536
	8	18.37	19.23	15.32	20.38	16.65	17.990
	10	19.98	14.98	16.32	15.79	18.26	17.066
ละเอียด	6	15.52	18.41	19.95	16.38	19.79	18.010
	8	14.39	20.93	18.41	14.99	16.89	17.122
	10	16.10	15.69	12.19	17.59	13.95	15.104

นำผลทดสอบค่าการตัดโค้งที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการตัดโค้ง

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการตัดโค้ง

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{20.39+18.78+19.89+15.89+17.89}{5} = 18.568 \text{ MPa}$$

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบแรงดึง

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)					
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	\bar{x}
หยาบ	6	7.768	10.610	9.096	11.162	10.950	9.917
	8	7.037	10.982	10.899	10.806	9.952	9.935
	10	10.498	10.621	9.228	11.718	11.255	10.664
ปานกลาง	6	9.792	8.045	8.636	10.122	10.354	9.380
	8	9.865	10.460	9.240	10.392	10.282	10.048
	10	10.128	9.285	10.481	10.742	9.895	10.106
ละเอียด	6	10.160	8.075	10.534	10.260	9.682	9.742
	8	10.786	8.002	11.158	10.123	11.474	10.309
	10	9.363	10.623	10.766	10.714	10.543	10.402

นำผลทดสอบค่าแรงดึงที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบแรงดึง

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบแรงดึง

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{7.768+10.610+9.096+11.162+10.950}{5} = 9.917 \text{ MPa}$$

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ค่าที่อ่านได้ (J)				
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5
หยาบ	6	1.232	1.072	0.904	1.000	0.901
	8	0.856	1.088	1.080	0.592	0.950
	10	0.920	1.032	0.672	0.776	1.127
ปานกลาง	6	0.856	0.832	1.032	1.136	0.920
	8	1.136	1.064	0.864	0.608	0.876
	10	0.984	1.200	0.824	0.888	0.578
ละเอียด	6	1.048	0.864	0.984	0.856	0.766
	8	0.896	0.832	1.056	0.768	0.972
	10	0.888	0.688	0.696	1.064	0.583

จากข้อมูลข้างต้น นำมาหาค่างานที่ใช้ในการกระแทก (W)

สูตร ความหนา - ค่าที่ได้ = งานที่ใช้ในการกระแทก (W)

$$5.9 - 1.080 = 4.820 \text{ J}$$

หาพื้นที่หน้าตัด (A)

สูตร $A = b.(h-t)$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } A &= 13.(5.9-2.54) \\ &= 43.68 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

หาความแข็งแรงของการกระแทก (a_k)

สูตร $a_k = \frac{\text{แรงที่ใช้ในการกระแทก}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}}$

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{4.820}{43.68 \times 10^{-3}} \\ &= 110.348 \text{ J/m}^2 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการทนต่อกระแทก

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การทนต่อแรงกระแทก (J/m ²)					
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	\bar{x}
หยาบ	6	97.208	101.155	102.295	100.334	102.865	100.771
	8	106.822	103.142	110.348	121.520	109.452	110.257
	10	106.176	104.808	115.139	118.546	110.264	110.987
ปานกลาง	6	105.331	110.101	103.895	100.099	106.879	105.261
	8	100.099	100.776	111.211	117.591	112.878	108.511
	10	111.516	98.578	116.209	106.257	112.351	108.982
ละเอียด	6	100.062	102.402	104.375	108.062	106.207	104.222
	8	104.061	110.961	101.957	114.156	110.080	108.243
	10	112.619	110.365	108.030	101.288	111.450	108.750

นำผลทดสอบค่าการทนต่อแรงกระแทกที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการทนต่อกระแทก

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการทนต่อกระแทก

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{97.208+101.155+102.295+100.334+102.865}{5} = 100.771 \text{ J/m}^2$$

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความแข็ง

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความแข็ง (Shore-D)														
		ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			ชั้นที่ 4			ชั้นที่ 5		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
หยาบ	6	45	44	51	50	49	48	54	49	50	56	48	53	52	50	52
	8	46	48	51	54	56	53	42	49	54	53	54	47	49	52	51
	10	50	54	53	53	51	50	49	53	51	50	58	52	53	56	55
ปานกลาง	6	47	55	50	46	57	51	50	49	48	40	45	52	44	53	50
	8	50	55	52	40	48	53	49	53	54	53	50	57	51	52	55
	10	49	54	48	54	48	40	54	55	53	53	51	46	52	53	50
ละเอียด	6	50	52	51	49	49	46	53	52	56	51	46	41	50	48	52
	8	51	52	51	53	53	49	51	57	54	53	52	57	52	53	55
	10	53	57	56	54	55	54	51	50	51	53	49	52	54	48	53

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

เมื่อ x_i แทนผลทดสอบค่าความแข็ง
 n แทนจำนวนตัวอย่างค่าความแข็ง
 \bar{X} แทนค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{45 + 44 + 51}{3} = 47$$

เพราะฉะนั้น ค่าความแข็งของชิ้นงานจากอลูมิเนียมพอยล์ เนื้อหยาบที่แรงอัดที่ 6 ชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 47

ตารางที่ ก.6 การทดสอบความแข็ง

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความแข็ง (Shore-D)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	47	49	51	52	51	50.00
	8	48	64	48	51	51	50.40
	10	52	51	51	53	55	52.40
ปานกลาง	6	51	51	49	46	49	49.20
	8	52	50	52	53	53	52.00
	10	50	47	54	50	52	50.60
ละเอียด	6	51	48	54	46	50	49.80
	8	51	52	54	54	53	52.80
	10	55	54	51	51	52	52.60

นำผลทดสอบค่าความแข็งที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบความแข็ง
 n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบความแข็ง

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{47+49+51+52+51}{5} = 50.00$$

ตารางที่ ก.7 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	น้ำหนัก (g)									
		ชั้นที่ 1		ชั้นที่ 2		ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 4		ชั้นที่ 5	
		ก่อนแช่	หลังแช่	ก่อนแช่	หลังแช่	ก่อนแช่	หลังแช่	ก่อนแช่	หลังแช่	ก่อนแช่	หลังแช่
หยาบ	6	21.88	22.06	21.90	22.08	21.87	22.06	21.89	22.05	21.92	22.08
	8	21.88	22.03	21.90	22.06	21.91	22.07	21.37	22.07	21.90	22.05
	10	20.75	20.88	20.77	20.90	20.64	20.78	20.88	21.00	20.63	20.75
ปานกลาง	6	20.71	20.83	20.70	20.82	20.72	20.84	20.70	20.83	20.74	20.85
	8	21.90	22.03	21.90	22.01	21.87	22.00	21.88	22.00	21.91	22.03
	10	20.72	20.82	20.69	20.80	20.67	20.78	20.66	20.78	20.71	20.82
ละเอียด	6	22.93	23.00	22.95	23.02	22.95	23.03	22.94	23.02	22.96	23.03
	8	22.93	23.00	22.94	23.01	22.92	23.00	22.95	23.02	22.95	23.02
	10	22.94	23.00	22.95	23.00	22.94	22.99	22.93	22.99	22.94	23.00

นำค่าน้ำหนักหลังการแช่น้ำลบด้วยค่าน้ำหนักก่อนการแช่น้ำของชิ้นงานหารด้วยน้ำหนักก่อนแช่น้ำของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์เนื้อหยาบที่แรงอัด 6 บาร์ ชั้นที่ 1 มาคำนวณจะได้

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{w-w_0}{w_0} \times 100$$

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ} = \frac{22.06 - 21.88}{21.88} \times 100 = 0.82 \%$$

เพราะฉะนั้น ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์ เนื้อหยาบที่แรงอัด 6 บาร์ ชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.82 %

ตารางที่ ก.8 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การดูดซึมน้ำ (%)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.82	0.82	0.86	0.73	0.73	0.79
	8	0.68	0.73	0.73	0.75	0.68	0.71
	10	0.62	0.63	0.68	0.57	0.58	0.62
ปานกลาง	6	0.58	0.58	0.58	0.63	0.53	0.58
	8	0.59	0.50	0.59	0.55	0.55	0.56
	10	0.48	0.53	0.53	0.58	0.53	0.53
ละเอียด	6	0.30	0.31	0.35	0.34	0.30	0.32
	8	0.30	0.31	0.34	0.30	0.31	0.31
	10	0.26	0.21	0.22	0.26	0.26	0.24

นำผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมฟอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.82+0.82+0.86+0.73+0.73}{5} = 0.79 \%$$

ตารางที่ ก. 9 ผลการทดสอบการพองตัว

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	น้ำหนัก (g)									
		ชั้นที่ 1		ชั้นที่ 2		ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 4		ชั้นที่ 5	
		ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ	ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ	ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ	ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ	ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ
หยาบ	6	6.05	6.1	5.55	5.6	6.1	6.16	5.95	6.0	6.06	6.11
	8	5.95	6.0	6.0	6.05	5.55	5.60	6.05	6.09	5.65	5.70
	10	6.75	6.79	6.5	6.54	5.90	5.95	6.1	6.15	5.93	5.97
ปานกลาง	6	6.1	6.15	6.05	6.1	6.1	6.15	6.0	6.05	6.03	6.08
	8	6.0	6.04	6.02	6.06	5.5	5.55	5.98	6.03	6.03	6.08
	10	5.9	5.94	6.2	6.25	6.2	6.24	5.7	5.73	5.93	5.97
ละเอียด	6	6.1	6.14	5.85	5.9	5.95	5.99	5.75	5.79	5.94	5.98
	8	5.95	5.99	6.01	6.06	6.0	6.04	6.0	6.04	5.99	6.03
	10	6.2	6.24	6.1	6.14	5.95	5.99	5.75	5.79	5.85	5.89

นำค่าความหนาหลังแช่น้ำลบกับค่าความหนาก่อนแช่น้ำของชิ้นงานแล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วยความหนาก่อนแช่น้ำของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์เนื้อหยาบที่แรงอัด 6 บาร์ ชั้นที่ 1 จากตาราง มาคำนวณ จะได้

$$\text{การพองตัวด้านความหนา (\%)} = \frac{T - T_0}{T_0} \times 100$$

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{6.1 - 6.05}{6.05} = 0.82 \%$$

เพราะฉะนั้นค่าการพองตัวด้านความหนาของชิ้นงานขนาดอลูมิเนียมฟอยล์หยาบที่แรงอัด 6 บาร์ ในครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.82 %

ตารางที่ ก.10 ค่าการทดสอบการพองตัว

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การพองตัว (%)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.82	0.90	0.98	0.84	0.83	0.87
	8	0.84	0.83	0.90	0.86	0.88	0.86
	10	0.59	0.61	0.84	0.81	0.67	0.70
ปานกลาง	6	0.81	0.82	0.81	0.83	0.83	0.82
	8	0.66	0.66	0.90	0.84	0.83	0.78
	10	0.67	0.80	0.64	0.52	0.67	0.66
ละเอียด	6	0.65	0.85	0.67	0.69	0.67	0.71
	8	0.67	0.83	0.66	0.66	0.67	0.70
	10	0.64	0.65	0.71	0.69	0.68	0.67

นำผลทดสอบค่าการพองตัวที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมฟอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการพองตัว

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการพองตัว

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.82+0.90+0.98+0.84+0.83}{5} = 0.87 \%$$

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความหนาแน่น (g)									
		ชั้นที่ 1		ชั้นที่ 2		ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 4		ชั้นที่ 5	
		ในอากาศ (A)	ในน้ำ (B)	ในอากาศ (A)	ในน้ำ (B)	ในอากาศ (A)	ในน้ำ (B)	ในอากาศ (A)	ในน้ำ (B)	ในอากาศ (A)	ในน้ำ (B)
หยาบ	6	0.1672	0.0425	0.1626	0.0427	0.1760	0.0460	0.1937	0.0514	0.1836	0.0480
	8	0.1709	0.0460	0.1843	0.0495	0.1998	0.0538	0.1796	0.0481	0.1862	0.0489
	10	0.1763	0.0489	0.1635	0.0456	0.1890	0.0531	0.1812	0.0480	0.1892	0.0529
ปานกลาง	6	0.1835	0.0475	0.1796	0.0482	0.1819	0.0470	0.1828	0.0478	0.1830	0.0469
	8	0.1743	0.0466	0.1689	0.0461	0.1949	0.0481	0.1567	0.0410	0.1874	0.0488
	10	0.1893	0.0496	0.1587	0.0423	0.1910	0.0512	0.1823	0.0487	0.1886	0.0489
ละเอียด	6	0.1764	0.0500	0.1739	0.0457	0.1869	0.0496	0.1999	0.0549	0.1878	0.0488
	8	0.1805	0.0491	0.1898	0.0505	0.1965	0.0539	0.1639	0.0448	0.1954	0.0527
	10	0.1814	0.0500	0.1900	0.0525	0.1907	0.0522	0.1530	0.0418	0.1820	0.0518

นำค่าน้ำหนักในอากาศหารด้วยค่าน้ำหนักในอากาศลบค่าน้ำหนักในน้ำคูณค่าความหนาแน่นของของเหลวของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์ เนื้อหยาบที่แรงอัด 6 บาร์ ชั้นที่ 1 มาคำนวณ จะได้

$$\frac{A}{A-B} \times \text{ความหนาแน่นของของเหลว}$$

เมื่อ A แทนน้ำหนักในอากาศ

B แทนน้ำหนักในน้ำ

$$\text{ค่าความหนาแน่นของของเหลว} = 0.786$$

$$\frac{0.1672}{0.1672-0.0425} \times 0.786 = 1.0538 \text{ g/cm}^3$$

เพราะฉะนั้น ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจากอลูมิเนียมฟอยล์ เนื้อหยาบที่แรงอัด 6 บาร์ชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.0538 g/cm^3

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	ความหนาแน่น (g/cm ³)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	1.0538	1.0658	1.0640	1.0699	1.0642	1.0635
	8	1.0754	1.0746	1.0755	1.0734	1.0659	1.0730
	10	1.0876	1.0899	1.0930	1.0691	1.0911	1.0861
ปานกลาง	6	1.0604	1.0743	1.0598	1.0642	1.0569	1.0631
	8	1.0728	1.0810	1.0434	1.0644	1.0627	1.0649
	10	1.0650	1.0716	1.0738	1.0724	1.0611	1.0688
ละเอียด	6	1.0968	1.0661	1.0699	1.0835	1.0619	1.0756
	8	1.0796	1.0709	1.0830	1.0816	1.0763	1.0783
	10	1.0850	1.0860	1.0821	1.0813	1.0987	1.0866

นำผลทดสอบค่าความหนาแน่นที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอลูมิเนียมฟอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบความหนาแน่น

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบความหนาแน่น

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{1.0538+1.0658+1.0604+1.0699+1.0642}{5} = 1.0635 \text{ g/cm}^3$$

ตารางที่ ก.13 ผลทดสอบการต้านทานความร้อน

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การต้านทานความร้อน(Thermal Resistance) (m ² .K) /W					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.0214	0.0229	0.0235	0.0244	0.0243	0.0233
	8	0.0227	0.0228	0.0225	0.0257	0.0231	0.0234
	10	0.0214	0.0258	0.0288	0.0397	0.0392	0.0310
ปานกลาง	6	0.0307	0.0308	0.0245	0.0249	0.0288	0.0279
	8	0.0272	0.0226	0.0248	0.0302	0.0295	0.0269
	10	0.0311	0.0289	0.0298	0.0290	0.0295	0.0297
ละเอียด	6	0.0366	0.0286	0.0267	0.0304	0.0339	0.0312
	8	0.0235	0.0257	0.0355	0.0372	0.0328	0.0309
	10	0.0385	0.0387	0.0391	0.0235	0.0288	0.0337

นำผลทดสอบค่าการต้านทานความร้อนที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอุณหภูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการต้านทานความร้อน

n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการต้านทานความร้อน

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.0214+0.0229+0.0235+0.0244+0.0243}{5} = 0.0233 \text{ (m}^2\text{.K) /W}$$

ตารางที่ ก.14 ผลทดสอบการนำความร้อน

ชนิดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การนำความร้อน (Thermal Conductivity) W/(mK)					\bar{x}
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
หยาบ	6	0.2083	0.2173	0.2290	0.2304	0.2302	0.2230
	8	0.2108	0.2173	0.2272	0.2298	0.2285	0.2227
	10	0.2173	0.2189	0.2211	0.2198	0.2186	0.2191
ปานกลาง	6	0.1667	0.1667	0.2083	0.2083	0.2076	0.1915
	8	0.1852	0.2273	0.2084	0.1667	0.2174	0.2010
	10	0.1889	0.1775	0.1852	0.1808	0.1868	0.1838
ละเอียด	6	0.1389	0.1786	0.1923	0.1667	0.1832	0.1719
	8	0.2174	0.2017	0.2124	0.1425	0.1498	0.1848
	10	0.1455	0.1482	0.1488	0.2174	0.2052	0.1730

นำผลทดสอบค่าการนำความร้อนที่ได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของอุณหภูมิเนียมพอยล์และแรงอัดมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

x_i แทนผลการทดสอบการนำความร้อน

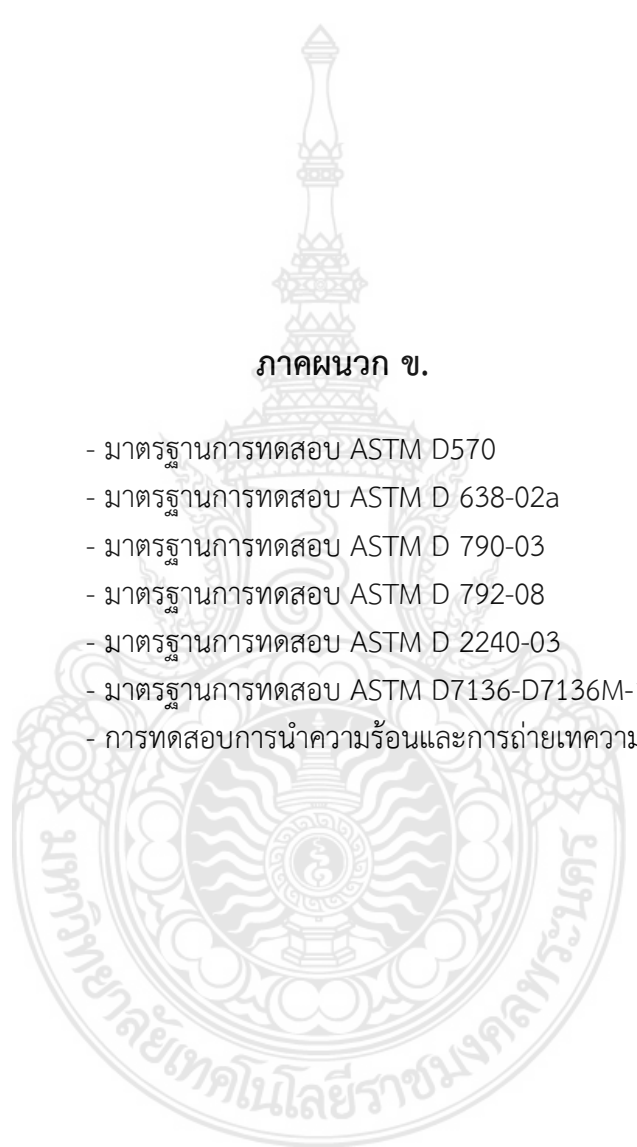
n แทนจำนวนตัวอย่างผลการทดสอบการนำความร้อน

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.2083+0.2173+0.2290+0.2304+0.2302}{5} = 0.2230 \text{ W/(mK)}$$

ตารางที่ ก.15 สรุปผลการทดสอบวัสดุ อลูมิเนียมพอยล์ จากกล่องเครื่องต้ม UHT รีไซเคิล

ขนาดวัสดุ	แรงอัด (bar)	การทดสอบ								
		การตัดโค้ง (MPa)	แรงดึง (MPa)	แรงกระแทก (J/m ²)	ความแข็ง (Shore-D)	การดูดซึมน้ำ (%)	การพองตัว (%)	ความหนาแน่น (g/m ³)	การต้านทานความร้อน (m ² .K/W)	การนำความร้อน (W/mK)
หยาบ	6	18.57	9.92	100.77	50.00	0.79	0.89	1.064	0.023	0.223
	8	18.30	9.94	110.26	50.40	0.71	0.86	1.073	0.023	0.223
	10	18.23	10.66	110.99	52.40	0.62	0.70	1.086	0.031	0.219
ปานกลาง	6	18.54	9.38	105.26	49.20	0.58	0.82	1.063	0.028	0.192
	8	17.99	10.05	108.51	52.00	0.56	0.78	1.065	0.027	0.201
	10	17.07	10.11	108.98	50.60	0.53	0.66	1.069	0.028	0.184
ละเอียด	6	18.01	9.74	104.22	49.80	0.32	0.71	1.076	0.031	0.172
	8	17.12	10.31	108.24	52.80	0.31	0.70	1.078	0.031	0.185
	10	15.10	10.40	108.75	52.60	0.24	0.67	1.087	0.034	0.173





ภาคผนวก ข.

- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D570
- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638-02a
- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 790-03
- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 792-08
- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240-03
- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D7136-D7136M-12
- การทดสอบการนำความร้อนและการถ่ายเทความร้อน

[Back to Polymers & Plastics \(/polymers-plastics/\)](#)

Water Absorption ASTM D570

Water Absorption 24 Hour/Equilibrium ASTM D570

Scope:

Water absorption is used to determine the amount of water absorbed under specified conditions. Factors affecting water absorption include: type of plastic, additives used, temperature and length of exposure. The data sheds light on the performance of the materials in water or humid environments.

Test Procedure:

For the water absorption test, the specimens are dried in an oven for a specified time and temperature and then placed in a desiccator to cool. Immediately upon cooling the specimens are weighed. The material is then emerged in water at agreed upon conditions, often 23°C for 24 hours or until equilibrium. Specimens are removed, patted dry with a lint free cloth, and weighed.

Specimen size:

Two inch diameter disks, 0.125" or 0.250" thick.

Data:

Water absorption is expressed as increase in weight percent.

Percent Water Absorption = $[(\text{Wet weight} - \text{Dry weight}) / \text{Dry weight}] \times 100$

Equipment Used:

Mettler balance

**Please note that this test description is intentionally generic in nature and aimed at providing a descriptive summary to enhance test understanding. Standards can be obtained from appropriate standard authorities.

[Testlopedia - The Plastics Testing Encyclopedia \(/polymers/testlopedia/\)](#)

[Moisture Content ASTM D789, ISO 15512 \(/polymers/testlopedia/moisture-content-astm-d789/\)](#)

Need help or have a question?

SEND US A REQUEST

+65 6805 4800

Email ([mailto:web.cp-apac@intertek.com?subject=Water Absorption ASTM D570 \(25544\)](mailto:web.cp-apac@intertek.com?subject=Water Absorption ASTM D570 (25544)))

Polymers & Plastics (/polymers/)

[Physical and Mechanical Testing of Polymers \(/polymers/testing/mechanical/\)](#)

[Polymers and Plastics Chemical Testing \(/polymers/testing/analytical/\)](#)

[Polymer Regulatory and Consulting Services \(/polymers/consulting/regulatory/\)](#)

[Polymer Product Processing Development Support \(/polymers/pilot-plant-processing/\)](#)

[Polymer Applications \(/polymers/applications/\)](#)

[Microbeads and Microplastics Testing and Consultancy \(/polymers-plastics/microbeads-and-microplastics-testing-and-consultancy/\)](#)

[Testlopedia® \(/polymers/testlopedia/\)](#)

[Composites Testing \(/composites/\)](#)

[Recycled Plastics Analysis \(/analytical-laboratories/recycled-plastics/\)](#)

[Automotive Polymers and Plastics Testing \(/automotive/polymers-and-plastics-testing/\)](#)

- [Flexible Polymer Packaging Testing \(/packaging/testing/film-sheet/\)](#)
- [Plastics A to Z \(/polymers/a-to-z/\)](#)
- [Coatings and Thin Films Analysis and Testing \(/chemicals/coatings-thin-films/\)](#)

Resources:

[Reference Guide to Evaluating Assembly Failure of Composites and Plastics \(/polymers/testlopedia/evaluating-assembly-failure-reference-guide/\)](#)

Polymers and Plastics

[Global Polymers and Plastics Testing \(/polymers-plastics/\)](#)

[Polymer and Plastics Services from A-Z \(/polymers/a-to-z/\)](#)

[Industries & Services \(/industries/\)](#)

[Knowledge \(/knowledge-education/\)](#)

[About Us \(/about/\)](#)

[Location \(/contact/\)](#)



© Intertek Group plc
[Disclaimer \(/legal/\)](#)

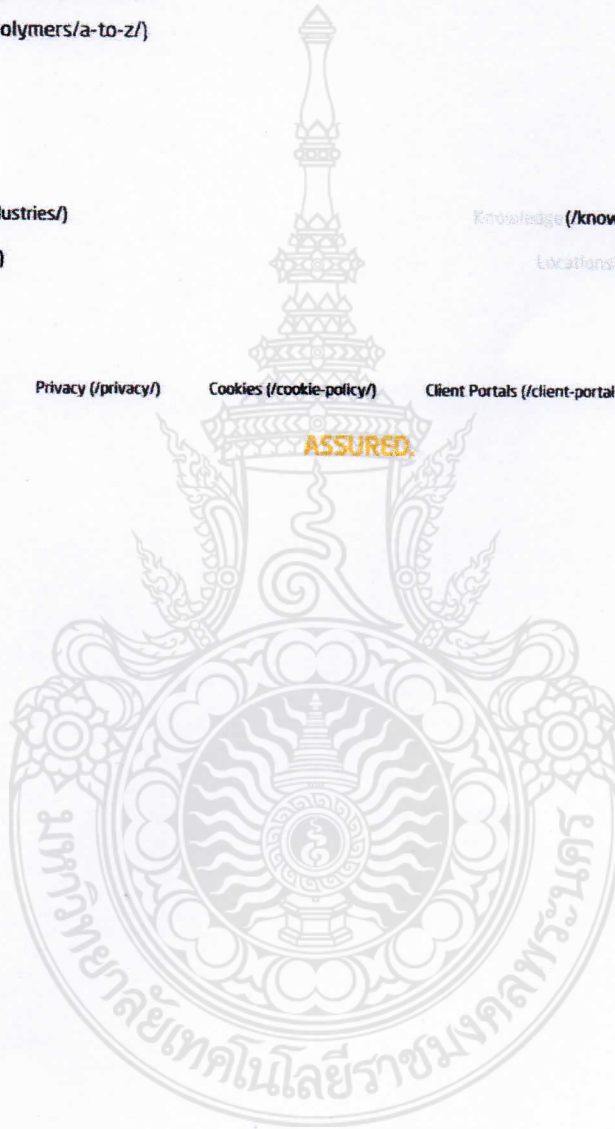
[Terms \(/terms/\)](#)

[Privacy \(/privacy/\)](#)

[Cookies \(/cookie-policy/\)](#)

[Client Portals \(/client-portals/\)](#)

ASSURED.





Designation: D 638 – 02a

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 standard has been approved for use by agencies of 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 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) must be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This test method and ISO 527-1 are technically equivalent.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead 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/D 3039M.

1.4 Test data obtained by this test method are relevant and appropriate for use in engineering design.

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

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved November 10, 2002. Published January 2003. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2002 as D 638 – 02.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, 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 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation²
- D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials⁵
- 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 Materials⁴
- D 3039/D 3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials⁶
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁷
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁷
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁸
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁹
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer⁹
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁹
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to

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 Discontinued; see 1994 Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.


⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

 D 638 - 02a

Determine the Precision of a Test Method¹⁰

2.2 ISO Standard:

ISO 527-1 Determination of Tensile Properties¹¹

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 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.

4.4 *Poisson's Ratio*—When uniaxial tensile force is applied to a solid, the solid stretches in the direction of the applied force (axially), but it also contracts in both dimensions lateral to the applied force. If the solid is homogeneous and isotropic, and the material remains elastic under the action of the applied force, the lateral strain bears a constant relationship to the axial strain. This constant, called Poisson's ratio, is defined as the negative ratio of the transverse (negative) to axial strain under uniaxial stress.

4.4.1 Poisson's ratio is used for the design of structures in which all dimensional changes resulting from the application of force need to be taken into account and in the application of the generalized theory of elasticity to structural analysis.

Note 6—The accuracy of the determination of Poisson's ratio is usually limited by the accuracy of the transverse strain measurements because the percentage errors in these measurements are usually greater than in the axial strain measurements. Since a ratio rather than an absolute quantity is measured, it is only necessary to know accurately the relative value of the calibration factors of the extensometers. Also, in general, the value of the applied loads need not be known accurately.

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 of the testing machine can be either the fixed or self-aligning type.

5.1.3.1 *Fixed grips* are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through the center line of the grip assembly.

5.1.3.2 *Self-aligning grips* are attached to the fixed and movable members of the testing machine 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.

5.1.3.3 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 2.4 mm (0.09 in.) apart and about 1.6 mm (0.06 in.) 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

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

¹¹ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

D 638 - 02a

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 8.

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 7—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.

5.1.7 Crosshead Extension Indicator—A suitable extension indicating mechanism capable of showing the amount of change in the separation of the grips, that is, crosshead movement. This mechanism shall be essentially free of inertial lag at the specified rate of testing and shall indicate the crosshead movement with an accuracy of $\pm 10\%$ of the indicated value.

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 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 mm/mm (in./in.) that automatically and continuously records shall be used. An extensometer classified by Practice E 83 as fulfilling the requirements of a B-2 classification within the range of use for modulus measurements 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 $\pm 1.0\%$ 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 $\pm 10\%$ of the measured value are acceptable.

5.2.4 Poisson's Ratio—Bi-axial extensometer or axial and transverse extensometers capable of recording axial strain and transverse strain simultaneously. The extensometers shall be capable of measuring the change in strains with an accuracy of 1 % of the relevant value or better.

NOTE 8—Strain gages can be used as an alternative method to measure axial and transverse strain; however, proper techniques for mounting strain gages are crucial to obtaining accurate data. Consult strain gage suppliers for instruction and training in these special techniques.

5.3 Micrometers—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) 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 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), (2) a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) 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 0.005 mm (0.0002 in.) over the entire foot area. Flatness of the foot and anvil shall conform to Test Method D 5947.

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

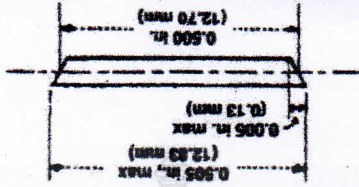
6. Test Specimens

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 7 mm (0.28 in.) 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 4 mm (0.16 in.) 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

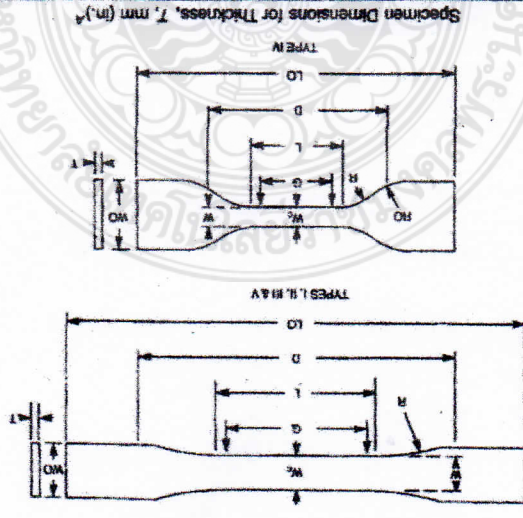
FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics



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 = 3.18 ± 0.03 mm (0.125 ± 0.001 in.),
 L = 9.53 ± 0.08 mm (0.375 ± 0.003 in.),
 G = 7.62 ± 0.02 mm (0.300 ± 0.001 in.), and
 R = 12.7 ± 0.08 mm (0.500 ± 0.003 in.).
 The other tolerances are those in the table.
 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-D20-1038.
 The width at the center, W_c , shall be +0.00 mm, -0.10 mm (-0.004 in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W 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:
 Overall widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.
 Test marks or initial extensometer span.
 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.

Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) 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 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) 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 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.
 For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Method D 412.
 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:

Dimensions (see drawings)	Type I	Type II	Type III	Type IV ^a	Type V ^{b,c}	Tolerances
W—Width of narrow section ^{e,f}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^c
L—Length of narrow section ^e	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	23 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^c
W _c —Width overall, min ^g	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
W _o —Width overall, min ^g	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
L _o —Length overall, min ^h	166 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ⁱ	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^c
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	66 (2.6)	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^c
R _o —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)



D 638 - 02a



Designation: D 792 – 08

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.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

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.

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 concerns, 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.*

NOTE 1—This standard is not equivalent to ISO 1183-1 Method A. This test method provides more guidelines on sample weight and dimension. ISO 1183-1 allows testing at an additional temperature of $27 \pm 2^\circ\text{C}$.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:²

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D 891 Test Methods for Specific Gravity, Apparent, of Liquid Industrial Chemicals

D 4968 Guide for Annual Review of Test Methods and Specifications for Plastics

D 6436 Guide for Reporting Properties for Plastics and Thermoplastic Elastomers

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

Current edition approved June 15, 2008. Published July 2008. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 2000 as D 792 - 00.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

E 1 Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers

E 12 Terminology Relating to Density and Specific Gravity of Solids, Liquids, and Gases³

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

IEEE/ASTM SI-10 Practice for Use of the International System of Units (SI) (the Modernized Metric System)

3. Terminology

3.1 *General*—The units, symbols, and abbreviations used in these test methods are in accordance with IEEE/ASTM SI-10.

3.2 *Definitions*:

3.2.1 *specific gravity (relative density)*—the ratio of the mass of a given volume of the impermeable portion of the material at 23°C to the mass of an equal volume of gas-free distilled or de-mineralized 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.

3.2.2 *density*—cubic metre of impermeable portion of the material at 23°C . The form of expression shall be:

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

NOTE 3—The SI unit of density, as defined in IEEE/ASTM SI-10, is kg/m^3 . To convert density in g/cm^3 to density in kg/m^3 , multiply by 1000.

NOTE 4—To convert specific gravity $23/23^\circ\text{C}$ to density 23°C , kg/m^3 , use the following equation:

$$D^{23}, \text{ kg/m}^3 = \text{sp gr } 23/23^\circ\text{C} \times 997.5$$

Where 997.5 kg/m^3 is the density of water at 23°C .

³ Withdrawn.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.



4. Summary of Test Method

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 is conveniently measured 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 material are due to localized differences in crystallinity, loss of plasticizer, absorption of solvent, or to other causes. It is possible that portions of a sample differ in density because of their differences in crystallinity, thermal history, porosity, and composition (types or proportions of resin, plasticizer, pigment, or filler).

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.

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 shall not 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, unless otherwise specified by the contract or relevant material specifications. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ 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 this specification or by the contract or relevant material specification. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ 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 of 0.1 mg or better is required for materials having densities less than 1.00 g/cm^3 and sample weights less than 10 grams. For all other materials and sample weights, a balance with precision of 1 mg or better is acceptable (see Note 5). The balance shall be equipped with a stationary support for the immersion vessel above the balance pan ("pan straddle").

Note 5—The balance shall provide the precision that all materials tested have three significant figures on density. In case that materials with different densities are tested on one single balance, use the balance that provides at least three significant figures for all materials concerned.

Note 6—To assure that the balance meets the performance requirements, check on zero point and sensitivity frequently and perform periodic calibration.

9.2 *Sample Holder*, corrosion-resistant (for example, wire, gemholder, etc.).

9.3 *Sinker*—A sinker for use with specimens of plastics that have specific gravities less than 1.00. 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 shall have an opening to facilitate attachment to the specimen and sample holder.

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

9.5 *Thermometer*—A thermometer readable to 0.1°C or better.

10. Materials

10.1 *Water*—The water shall be substantially air-free and distilled or de-mineralized water.

Note 7—Air in water can be removed by boiling and cooling the water, or by shaking the water under vacuum in a heavy-walled vacuum flask. (Warning—Use gloves and shielding.) If the water does not wet the specimen, add a few drops of a wetting agent into the water. If this solution does not wet the specimen, Method B shall be used.

11. Test Specimen


11.1 The test specimen shall be a single piece of material with a size and shape suitable for the testing apparatus, 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 shall be at least 1 mm for each 1 g of weight. A specimen weighing 1 to 5 g was found to be convenient, but specimens up to approximately 50 g are also acceptable (see Note 8). Care shall 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 Measure and record the water temperature.


D 792 - 08

12.2 Weigh the specimen in air. Weigh to the nearest 0.1 mg for specimens of mass 1 to 10 g and density less than 1.00 g/cm³. Weigh to the nearest 1 mg for other specimens.

12.3 If necessary, 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. In this case attach the specimen to the wire such that it is suspended about 25 mm above the vessel support.

NOTE 9—If a wire is used, weigh the specimen in air after hanging from the wire. In this case, record the mass of the specimen, a = (mass of specimen + wire, in air) - (mass of wire in air).

12.4 Mount the immersion vessel on the support, and completely immerse the suspended specimen (and sinkers, if used) in water (see 10.1) at a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$. The vessel must not touch sample holder or specimen. Remove any bubbles adhering to the specimen, sample holder, or sinker, by rubbing them with a wire. Pay particular attention to holes in the specimen and sinker. If the bubbles are not removed by this method or if bubbles are continuously formed (as from dissolved gases), the use of vacuum is recommended (see Note 10). Determine the mass of the suspended specimen to the required precision (see 12.2) (see Note 11). 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—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 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.

NOTE 11—It may be necessary to change the sensitivity adjustment of the balance to overcome the damping effect of the immersed specimen.

12.5 Weigh the sample holder (and sinker, if used) in water with immersion to the same depth as used in the previous step (Notes 12 and 13). Record this weight as w (mass of the sample holder in liquid).

NOTE 12—If a wire is used, 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 is 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 used and is left attached to the balance arm during a series of determinations, determine the mass a with the aid of a

tare on the other arm of the balance or as in Note 9. 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.

12.6 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. Use additional specimens if desired.

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:

$$D^{23^\circ\text{C}}, \text{ kg/m}^3 = \text{sp gr } 23/23^\circ\text{C} \times 997.5$$

13.3 If the temperature of the water is different than 23°C , use the density of water listed in Table 3 directly, or use the following equations to calculate the density of water at testing temperature:

$$M = \Delta D / \Delta t \quad (1)$$

$$D(\text{conversion to } 23^\circ\text{C}), \text{ kg/m}^3 = \text{sp gr } t_a/t_w \times [997.5 + (t_w - 23) \times M] \quad (2)$$

and

$$\text{sp gr } 23/23 = D(\text{conversion to } 23^\circ\text{C})/997.5 \quad (3)$$

where:

M = slope,

ΔD = difference between the lowest and highest temperature tolerance for the standard density of water ($D @ 21^\circ\text{C} - D @ 25^\circ\text{C}$),

Δt = difference between the highest and lowest temperature tolerance recommended, ($21^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$),

t_a = temperature of air, and

t_w = temperature of water.

14. Report

14.1 Report the following information:

TABLE 1 Test Method A Specific Gravity Tested in Water

Material	Mean	S_L^A	S_R^B	r^C	R^D
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

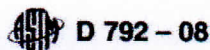
^A S_L = within laboratory standard deviation for the individual material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_L = [(s_1)^2 + (s_2)^2 \dots + (s_n)^2/n]^{1/2}$$

^B S_R = between-laboratories reproducibility, expressed as standard deviation: $S_R = [S_L^2 + S_L^2]^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means.

^C r = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times S_L$.

^D R = between-laboratories critical interval between two test results = $2.8 \times S_R$.



D 792 - 08

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

Material	Mean	S_r^A	S_R^B	r^C	R^D
Polypropylene	0.9023	0.00139	0.00239	0.00393	0.00669
LDPE	0.9215	0.00109	0.00195	0.00308	0.00546
HDPE	0.9678	0.00126	0.00189	0.00356	0.00529
Thermoset	1.3130	0.00160	0.00217	0.00453	0.00608

^A S_r = within laboratory standard deviation for the individual material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2/n]^{1/2}$$

^B S_R = between-laboratories reproducibility, expressed as standard deviation: $S_R = [S_r^2 + S_L^2]^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means.

^C r = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times S_r$.

^D R = between-laboratories critical interval between two test results = $2.8 \times S_R$.

TABLE 3 Standard Density of Water^A

°C	$\rho = \text{kg m}^{-3}$									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
21	997.9948	9731	9513	9294	9073	8852	8630	8406	8182	7957
22	997.7730	7503	7275	7045	6815	6584	6351	6118	5883	5648
23	997.5412	5174	4936	4697	4456	4215	3973	3730	3485	3240
24	997.2994	2747	2499	2250	2000	1749	1497	1244	0990	0735
25	997.0480	0223	9965 ^B	9707 ^B	9447 ^B	9186 ^B	8925 ^B	8663 ^B	8399 ^B	8135 ^B

^A Obtained from *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 78th edition, 1997-1998.

^B The leading figure decreases by 1.

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 corrected to 23.0°C (Table 3) are reported as $sp\ gr\ 23/23^\circ C = \underline{\hspace{2cm}}$, or average density reported as $D^{23C} = \underline{\hspace{2cm}}\text{ kg/m}^3$.

NOTE 14—Reporting density in g/cm^3 is also acceptable provided that it is agreed upon by the users.

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 Report the temperature of the water.

14.1.5 Report the density and specific gravity with three significant figures.

14.1.6 Any evidence of porosity of the material or specimen.

14.1.7 The method of test (that is, Method A of Test Method D 792), and

14.1.8 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 are lighter than water.

17. Apparatus

17.1 The apparatus shall include the balance, wire, and 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 cap over the stopper.


17.4 *Thermometer*—A thermometer having ten divisions per degree Celsius 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. A thermometer short enough to be handled inside the balance case will be found convenient. ASTM Thermometer 23C (see Specification E 1) and Anschütz-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 $23 \pm 0.1^\circ C$.

18. Materials

18.1 *Immersion Liquid*—The liquid used shall not dissolve, swell, or otherwise affect the specimen, but shall wet it and shall have a specific gravity less than that of the specimen. In addition, the immersion liquid shall be non-hygroscopic, has a low vapor pressure, a low viscosity, and a high flash point, and shall 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 established experimentally in the particular application that a lesser frequency of determination also provides the desired precision.

NOTE 15—For the determination of the specific gravity of the liquid, the use of a standard plummet of known volume 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:


D 792 - 08

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 with immersion liquid. Determine the mass with the 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 16—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 not necessary for the purposes of these methods.

19. Test Specimen

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: (see 13.1)

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

22. Report

22.1 See Section 14.

23. Precision and Bias

23.1 Tables 1 and 2 are based on an interlaboratory study⁴ conducted in 1985 in accordance with Practice E 691, involving 5 materials tested with Test Method A by six laboratories or four materials tested with Test Method B by six laboratories. Each test result was based on two individual determinations and each laboratory obtained four test results for each material. (Warning—The explanations of r and R are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of these test methods. The data of Tables 1 and 2 should not be applied to acceptance or rejection of materials, as these data apply only to the materials tested in the round robin and are unlikely to be rigorously representative of other lots, formulations, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to the materials and laboratory (or between specific laboratories). The principles of 23.2-23.2.3 would then be valid for such data.)

23.2 Concept of r and R in Tables 1 and 2—If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from 4 test results for each material, then:

23.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the r value for that material. The concept r is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

23.2.2 *Reproducibility*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the R value for that material. The concept R is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

23.2.3 Any judgment in accordance with 23.2.1 or 23.2.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

23.3 There are no recognized standards by which to estimate bias of this test method.

24. Keywords

24.1 density; relative density; specific gravity

⁴ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1133.



D 792 - 08

SUMMARY OF CHANGES

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D 792 - 00) that may impact the use of this standard. (June 15, 2008)

- | | |
|--|--|
| <p>(1) Deleted references to D 1898, Old Note 1, Note 6, and rearranged the order of Notes.</p> <p>(2) Revised Note 1, ISO Statement.</p> <p>(3) Added Guide D 6436 to Reference Documents.</p> <p>(4) Re-defined specific gravity in by changing "unit volume" to "given volume." Removed "equal density of."</p> <p>(5) Changed accuracy requirement for balance and thermometer in 9.1, 9.5, and 12.2.</p> | <p>(6) Clarified definition of ΔD and deleted "-" in equation in 13.3.</p> <p>(7) Changed significant figures from four to three to harmonize with Guide D 6436 in 14.1.5.</p> <p>(8) Added Note 5 and Note 14.</p> <p>(9) Editorial changes, including the removal of permissive languages from the text.</p> |
|--|--|

ASTM International 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 International 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, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



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 4 mm (0.16 in.) or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

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 14 mm (0.55 in.) must be machined to 14 mm (0.55 in.) for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.

Note 9—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 7.3.

Note 10—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 11—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.

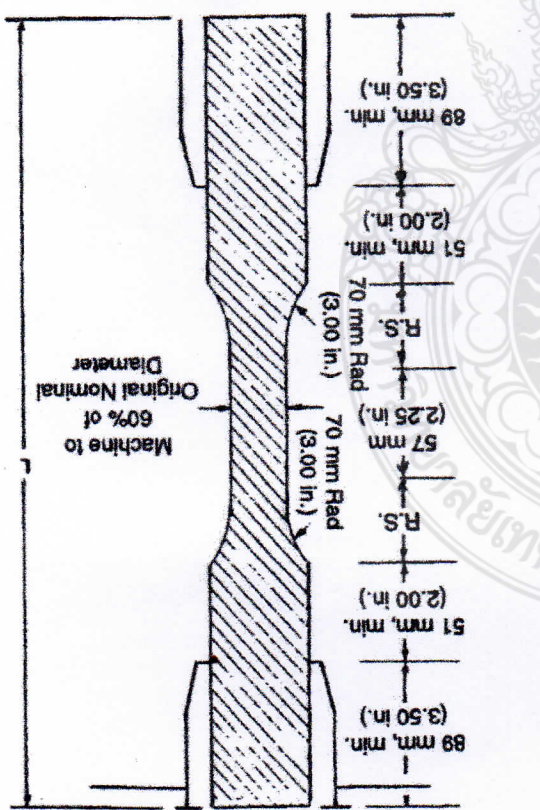
6.2 *Rigid Tubes*—The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60% of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) 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 25 mm (1 in.) 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.

6.3 *Rigid Rods*—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 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) 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 paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes shall be smoothed with a fine file or

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

6.6 Care shall also be taken to avoid other common machining errors.



DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Standard Length, L , of Specimen to Be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^a	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Sections, ZR.S. Length of Radial	Nominal Diam-
381 (15)	361 (14.20)	24.0 (0.946)	4.7 (¼)
381 (15)	364 (14.34)	27.7 (1.091)	6.4 (¼)
381 (15)	370 (14.58)	33.9 (1.333)	9.5 (¾)
400 (15.75)	376 (14.79)	39.0 (1.536)	12.7 (½)
400 (15.75)	380 (14.98)	43.5 (1.714)	15.9 (¾)
400 (15.75)	384 (15.12)	47.6 (1.873)	19.0 (¾)
400 (15.75)	388 (15.27)	51.5 (2.019)	22.2 (¾)
419 (16.5)	391 (15.40)	54.7 (2.154)	25.4 (1)
419 (16.5)	396 (15.65)	60.9 (2.398)	31.8 (1¼)
419 (16.5)	403 (15.87)	66.4 (2.615)	38.1 (1½)
419 (16.5)	408 (16.06)	71.4 (2.812)	42.5 (1¾)
432 (17)	412 (16.24)	76.0 (2.993)	50.8 (2)

mm (in.)

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



Designation: D 790 – 03

Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 790; 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 standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high-modulus composites and electrical insulating materials in the form of rectangular bars molded directly or cut from sheets, plates, or molded shapes. These test methods are generally applicable to both rigid and semirigid materials. However, flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or that do not fail in the outer surface of the test specimen within the 5.0% strain limit of these test methods. These test methods utilize a three-point loading system applied to a simply supported beam. A four-point loading system method can be found in Test Method D 6272.

1.1.1 *Procedure A*, designed principally for materials that break at comparatively small deflections.

1.1.2 *Procedure B*, designed particularly for those materials that undergo large deflections during testing.

1.1.3 Procedure A shall be used for measurement of flexural properties, particularly flexural modulus, unless the material specification states otherwise. Procedure B may be used for measurement of flexural strength only. Tangent modulus data obtained by Procedure A tends to exhibit lower standard deviations than comparable data obtained by means of Procedure B.

1.2 Comparative tests may be run in accordance with either procedure, provided that the procedure is found satisfactory for the material being tested.

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

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, 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.*

NOTE 1—These test methods are not technically equivalent to ISO 178.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing²

D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials³

D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁴

D 6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending⁴

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to these test methods appear in Terminology D 883 and Annex A1 of Test Method D 638.

4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1). A support span-to-depth ratio of 16:1 shall be used unless there is reason to suspect that a larger span-to-depth ratio may be required, as may be the case for certain laminated materials (see Section 7 and Note 8 for guidance).

4.2 The specimen is deflected until rupture occurs in the outer surface of the test specimen or until a maximum strain (see 12.7) of 5.0% is reached, whichever occurs first.

4.3 Procedure A employs a strain rate of 0.01 mm/mm/min [0.01 in./in./min] and is the preferred procedure for this test method, while Procedure B employs a strain rate of 0.10 mm/mm/min [0.10 in./in./min].

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

Current edition approved March 10, 2003. Published April 2003. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 2002 as D 790 – 02.

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


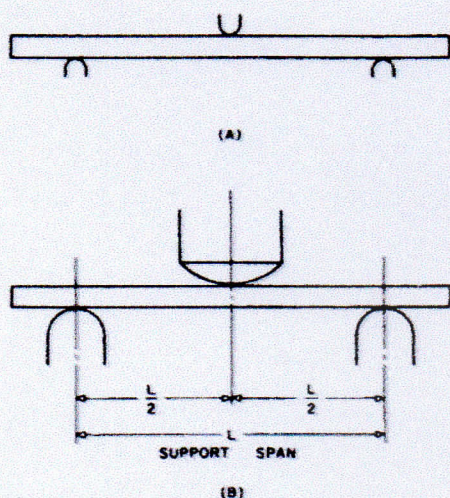
³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

 D 790 - 03


NOTE—(a) Minimum radius = 3.2 mm [$\frac{1}{8}$ in.]. (b) Maximum radius supports 1.6 times specimen depth; maximum radius loading nose = 4 times specimen depth.

FIG. 1 Allowable Range of Loading Nose and Support Radii

5. Significance and Use

5.1 Flexural properties as determined by these test methods are especially useful for quality control and specification purposes.

5.2 Materials that do not fail by the maximum strain allowed under these test methods (3-point bend) may be more suited to a 4-point bend test. The basic difference between the two test methods is in the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stresses. The maximum axial fiber stresses occur on a line under the loading nose in 3-point bending and over the area between the loading noses in 4-point bending.

5.3 Flexural properties may vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and the difference in rate of straining as specified in Procedures A and B (see also Note 8).

5.4 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there are no material specifications, then the default conditions apply. Table I in Classification System D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist for plastics.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*—A properly calibrated testing machine that can be operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated, and in which the error in the load measuring system shall not exceed $\pm 1\%$ of the maximum load expected to be measured. It shall be equipped with a deflection measuring device. The stiffness of the testing machine shall be such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1% of the total deflection of the test specimen during

TABLE 1 Flexural Strength

Material	Mean, 10^3 psi	Values Expressed in Units of % of 10^3 psi			
		V_i^A	V_R^B	C^C	R^D
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP thermoset	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
Cast acrylic	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR polyester	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR polycarbonate	21.0	5.16	6.05	14.6	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

^A V_i = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories: $S_r = [(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2/n]^{1/2}$ then $V_i = (S_r \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^B V_R = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation: $S_R = [(S_1^2 + S_2^2)^{1/2}]$ where S_L is the standard deviation of laboratory means. Then: $V_R = (S_R \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^C C = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_i$.

^D R = between-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_R$.

testing, or appropriate corrections shall be made. The load indicating mechanism shall be essentially free from inertial lag at the crosshead rate used. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

6.2 *Loading Noses and Supports*—The loading nose and supports shall have cylindrical surfaces. In order to avoid excessive indentation, or failure due to stress concentration directly under the loading nose, the radii of the loading nose and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm [0.197 ± 0.004 in.] unless otherwise specified or agreed upon between the interested clients. When other loading noses and supports are used they must comply with the following requirements: they shall have a minimum radius of 3.2 mm [$\frac{1}{8}$ in.] for all specimens, and for specimens 3.2 mm or greater in depth, the radius of the supports may be up to 1.6 times the specimen depth. They shall be this large if significant indentation or compressive failure occurs. The arc of the loading nose in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the nose (see Fig. 1). The maximum radius of the loading nose shall be no more than 4 times the specimen depth.

NOTE 2—Test data have shown that the loading nose and support dimensions can influence the flexural modulus and flexural strength values. The loading nose dimension has the greater influence. Dimensions of the loading nose and supports must be specified in the material specification.

6.3 *Micrometers*—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm [0.001 in.] 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: a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa [3.6 ± 0.36 psi], a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm [0.250 ± 0.001 in.] in diameter and a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm [0.002 in.] over the entire foot area. Flatness of foot and anvil shall conform to the portion of the Calibration section of Test Methods D 5947.



Designation: D 2240 – 03

Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness¹

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

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method describes twelve types of rubber hardness measurement devices known as durometers: Types A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S, and R. The procedure for determining indentation hardness of substances classified as thermoplastic elastomers, vulcanized (thermoset) rubber, elastomeric materials, cellular materials, gel-like materials and some plastics is also described.

1.2 This test method is not equivalent to other indentation hardness methods and instrument types, specifically those described in Test Method D 1415.

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

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only. Many of the stated dimensions in SI are direct conversions from the U. S. Customary System to accommodate the instrumentation, practices and procedures that existed prior to the Metric Conversion Act of 1975.

1.5 All materials, instruments, or equipment used for the determination of mass, force or dimension shall have traceability to the National Institute for Standards and Technology, or other internationally recognized organization parallel in nature.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, 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 374 Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation²

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing³

D 785 Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials³

D 1349 Practice for Rubber—Standard Temperatures For Testing⁴

D 1415 Test Method for Rubber Property—International Hardness⁴

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

F 1957 Test Method for Composite Foam Hardness-Durometer Hardness⁵

2.2 ISO Standards:

ISO/IEC 17025: 1999 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories⁶

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. Durometers with maximum reading indicators used to determine maximum hardness values of a material may yield lower hardness when the maximum indicator is used.

3.2 The procedures for Type M, or micro hardness durometers, accommodate specimens that are, by their dimensions or configuration, ordinarily unable to have their durometer hardness determined by the other durometer types described. Type M durometers are intended for the testing of specimens having a thickness or cross sectional diameter of 1.25 mm (0.050 in.) or greater, although specimens of lesser dimensions may be successfully accommodated under the conditions specified in Section 6, and have a Type M durometer hardness range of between 20 and 90. Those specimens which have a durometer hardness range other than specified shall use another suitable procedure for determining durometer hardness.

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 geometry of the*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D11 on Rubber and is the direct responsibility of Subcommittee D11.10 on Physical Testing.

Current edition approved May 10, 2003. Published May 2003. Originally approved in 1964. Last previous edition approved in 2002 as D 2240 – 02b.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.07.

⁶ Available from International Organization for Standardization (ISO), 1 rue de Varembé, Case postale 56, CH-1211, Geneva 20, Switzerland.


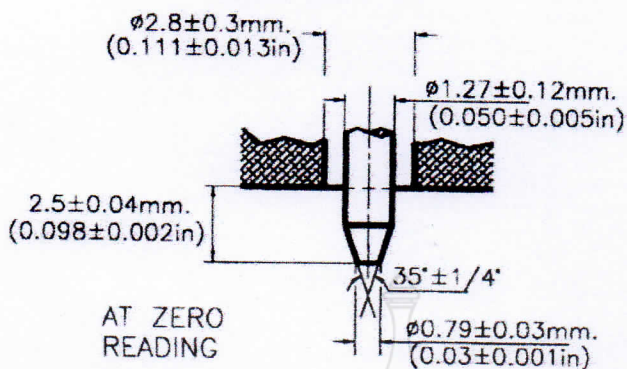
 D 2240 - 03


FIG. 1 (a) Type A and C Indentor

indentor and the applied force influence the measurements such that no simple relationship exists between the measurements obtained with one type of durometer and those obtained with another type of durometer or other instruments used for measuring hardness. This test method is an empirical test intended primarily for control purposes. No simple relationship exists 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 materials other than those described in 1.1.

5. Apparatus

5.1 Hardness measuring apparatus, or durometer, and an operating stand, Type 1, Type 2, or Type 3 (see 5.1.2) consisting of the following components:

5.1.1 Durometer:

5.1.1.1 *Presser Foot*, the configuration and the total area of a durometer presser foot may produce varying results when there are significant differences between them. It is recommended that when comparing durometer hardness determinations of the same type (see 4.1), that the comparisons be between durometers of similar presser foot configurations and total area, and that the presser foot configuration and size be noted in the Hardness Measurement Report (see 10.2.4 and 5.1.1.3).

5.1.1.2 *Presser Foot*, Types A, B, C, D, DO, E, O, OO, OOO, and OOO-S, with an orifice (to allow for the protrusion of the indentor) having a diameter as specified in Fig. 1 (a, b, c, d, e, f, and g), with the center a minimum of 6.0 mm (0.24 in.) from any edge of the foot. When the presser foot is not of a flat circular design, the area shall not be less than 500 mm² (19.7 in²).⁷

NOTE 1—The Type OOO and the Type OOO-S, designated herein, differ in their indentor configuration, spring force, and the results obtained. See Table 1 and Fig. 1 (e and g).

5.1.1.3 *Presser Foot*—flat circular designs designated as Type xR, where x is the standard durometer designation and R indicates the flat circular press foot described herein, for example, Type aR, dR, etc. The presser foot, having a centrally

located orifice (to allow for the protrusion of the indentor) of a diameter as specified in Fig. 1 (a through g). The flat circular presser foot shall be 18 ± 0.5 mm (0.71 ± 0.02 in.) in diameter. These durometer types shall be used in an operating stand (see 5.1.2).

(a) Durometers having a presser foot configuration other than that indicated in 5.1.1.3 shall not use the Type xR designation, and it is recommended that their presser foot configuration and size be stated in the Hardness Measurement Report (see 10.2.4).

5.1.1.4 *Presser Foot, Type M*, with a centrally located orifice (to allow for the protrusion of the indentor), having a diameter as specified in Fig. 1 (d), with the center a minimum of 1.60 mm (0.063 in.) from any edge of the flat circular presser foot. The Type M durometer shall be used in a Type 3 operating stand (see 5.1.2.4).

5.1.1.5 *Indentor*, formed from steel rod and hardened to 500 HV10 and shaped in accordance with Fig. 1 (a, b, c, d, e, or g), polished over the contact area so that no flaws are visible under 20× magnification, with an indentor extension of 2.50 ± 0.04 mm (0.098 ± 0.002 in.).

5.1.1.6 *Indentor, Type OOO-S*, formed from steel rod and hardened to 500 HV10, shaped in accordance with Fig. 1 (f), polished over the contact area so that no flaws are visible under 20× magnification, with an indentor extension of 5.00 ± 0.04 mm (0.198 ± 0.002 in.).

5.1.1.7 *Indentor, Type M*, formed from steel rod and hardened to 500 HV10 and shaped in accordance with Fig. 1 (d), polished over the contact area so that no flaws are visible under 50× magnification, with an indentor extension of 1.25 ± 0.02 mm (0.049 ± 0.001 in.).

5.1.1.8 *Indentor Extension Indicator*, analog or digital electronic, having a display that is an inverse function of the indentor extension so that:

(a) the display shall indicate from 0 to 100 with no less than 100 equal divisions throughout the range at a rate of one hardness point for each 0.025 mm (0.001 in.) of indentor movement,

(b) the display for Type OOO-S durometers shall indicate from 0 to 100 with no less than 100 equal divisions throughout the range at a rate of one hardness point for each 0.050 mm (0.002 in.) of indentor movement,

⁷ The Type OOO-S, manufactured by the Shore Instrument Company, Division of Instron Corporation, Canton, MA, was previously designated as Type OOO.


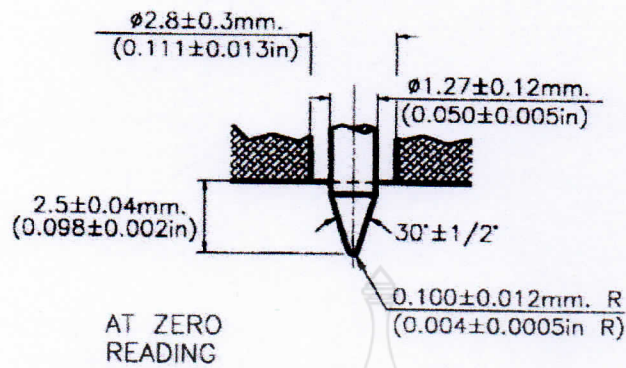
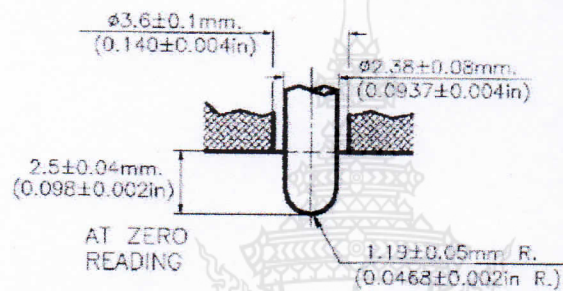
 D 2240 - 03


FIG. 1 (b) Type B and D Indentor (continued)



(Fig 1C)

Figure 1c. O, DO, and OO Indentor

FIG. 1 (c) O, DO, and OO Indentor (continued)

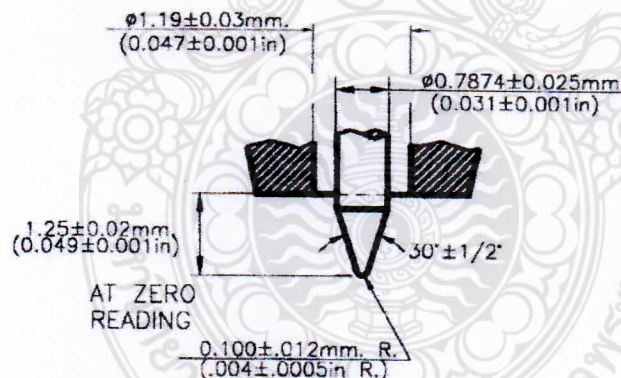


FIG. 1 (d) Type M Indentor (continued)

(c) the display for Type M durometers shall indicate from 0 to 100 with no less than 100 equal divisions at a rate of one hardness point for each 0.0125 mm (0.0005 in.) of indenter movement, and

(d) in the case of analog dial indicators having a display of 360° , the points indicating 0 and 100 may be at the same point on the dial and indicate 0, 100, or both.

5.1.1.9 *Timing Device (optional)*, capable of being set to a desired elapsed time, signaling the operator or holding the hardness reading when the desired elapsed time has been reached. The timer shall be automatically activated when the

presser foot is in contact with the specimen being tested, for example, the initial indenter travel has ceased. Digital electronic durometers may be equipped with electronic timing devices that shall not affect the indicated reading or determinations attained by more than one-half of the calibration tolerance stated in Table 1.

5.1.1.10 *Maximum indicators (optional)*, maximum indicating pointers are auxiliary analog indicating hands designed to remain at the maximum hardness value attained until reset by


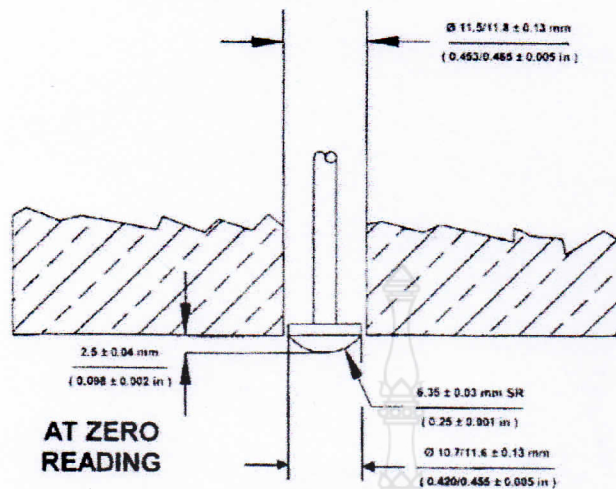
 D 2240 - 03


FIG. 1 (e) Type OOO Indentor (continued)

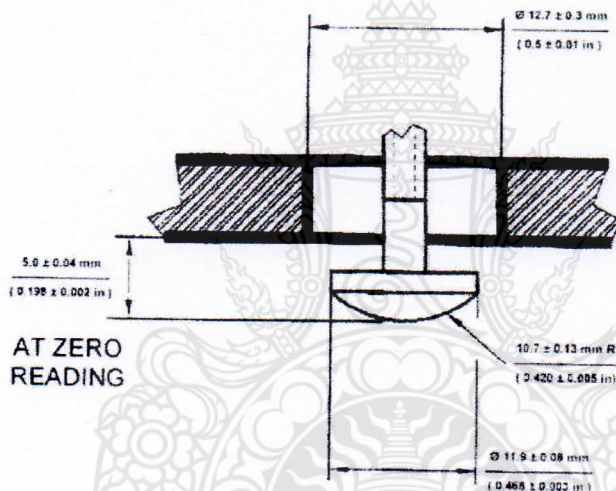


FIG. 1 (f) Type OOO-S Indentor (continued)

the operator. Electronic maximum indicators are digital displays electronically indicating and maintaining the maximum value hardness valued achieved until reset by the operator.

5.1.1.11 Analog maximum indicating pointers have been shown to have a nominal effect on the values attained, however, this effect is greater on durometers of lesser total mainspring loads, for example, the effect of a maximum indicating pointer on Type D durometer determinations will be less than those determinations achieved using a Type A durometer. Analog style durometers may be equipped with maximum indicating pointers. The effect of a maximum indicating pointer shall be noted at the time of calibration in the calibration report (see 10.1.5), and when reporting hardness determinations (see 10.2.4). Analog Type M, OO, OOO, and Type OOO-S durometers shall not be equipped with maximum indicating pointers.

5.1.1.12 Digital electronic durometers may be equipped with electronic maximum indicators that shall not affect the indicated reading or determinations attained by more than one half of the spring calibration tolerance stated in Table 1.

5.1.1.13 *Calibrated Spring*, for applying force to the indenter, in accordance with Fig. 1 (a through g) and capable of applying the forces as specified in Table 1.

5.1.2 *Operating Stand* (Fig. 2):

5.1.2.1 Type 1, Type 2, and Type 3, shall be capable of supporting the durometer presser foot surface parallel to the specimen support table (Fig. 3) throughout the travel of each. The durometer presser foot to specimen support table parallelism shall be verified each time the test specimen support table is adjusted to accommodate specimens of varying dimensions. This may be accomplished by applying the durometer presser foot to the point of contact with the specimen support table and making adjustments by way of the durometer mounting assembly or as specified by the manufacturer.

5.1.2.2 *Operating Stand, Type 1* (specimen to indenter type), shall be capable of applying the specimen to the indenter in a manner that minimizes shock.

5.1.2.3 *Operating Stand, Type 2* (indenter to specimen type), shall be capable of controlling the rate of descent of the indenter to the specimen at a maximum of 3.20 mm/s (0.125

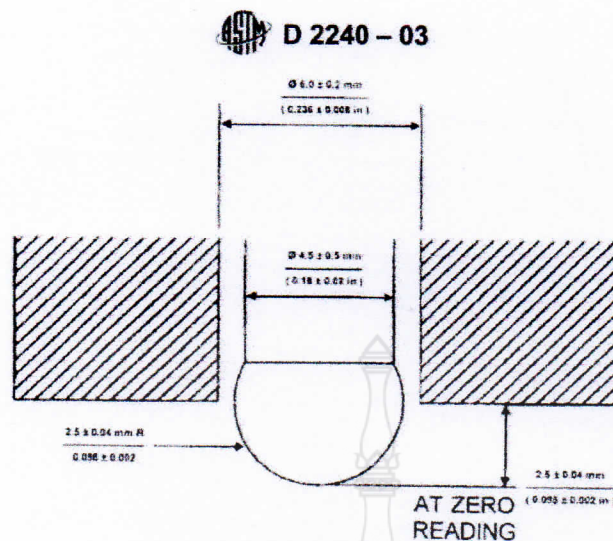


FIG. 1 (g) Type E Indenter (continued)

TABLE 1 Durometer Spring Force Calibration^A
All Values are in N

Indicated Value	Type A, B, E, O	Type C, D, DO	Type M	Type OO, OOO	Type OOO-S
0	0.55	0	0.324	0.203	0.167
10	1.3	4.445	0.368	0.294	0.343
20	2.05	8.89	0.412	0.385	0.520
30	2.8	13.335	0.456	0.476	0.696
40	3.55	17.78	0.5	0.566	0.873
50	4.3	22.225	0.544	0.657	1.049
60	5.05	26.67	0.589	0.748	1.226
70	5.8	31.115	0.633	0.839	1.402
80	6.55	35.56	0.677	0.93	1.579
90	7.3	40.005	0.721	1.02	1.755
100	8.05	44.45	0.765	1.111	1.932
N/durometer unit	0.075	0.4445	0.0044	0.00908	0.01765
Spring Calibration Tolerance	± 0.075 N	± 0.4445 N	± 0.0176 N	± 0.0182 N	± 0.0353 N

^A Refer to 5.1.1.3 for the Type xR designation.

in/s) and applying a force sufficient to overcome the calibrated spring force as shown in Table 1.

5.1.2.4 *Operating Stand, Type 3* (indenter to specimen type), hydraulic dampening, pneumatic dampening or electro-mechanical (required for the operation of Type M durometers) shall be capable of controlling the rate of descent of the indenter to the specimen at a maximum of 3.2 mm/s (0.125 in/s) and applying a force sufficient to overcome the calibrated spring force as shown in Table 1. Manual application, Type 1 or Type 2 operating stands are not acceptable for Type M durometer operation.

5.1.2.5 The entire instrument should be plumb and level, and resting on a surface that will minimize vibration. Operating the instrument under adverse conditions will negatively affect the determinations attained.

5.1.2.6 *Specimen Support Table*, (Fig. 3) integral to the operating stand, and having a solid flat surface. The specimen support platform may have orifices designed to accept various inserts or support fixtures (Fig. 3) to provide for the support of irregularly configured specimens. When inserts are used to support test specimens, care must be taken to align the indenter to the center of the insert, or the point at which the indenter is to contact the specimen. Care should be exercised to assure that


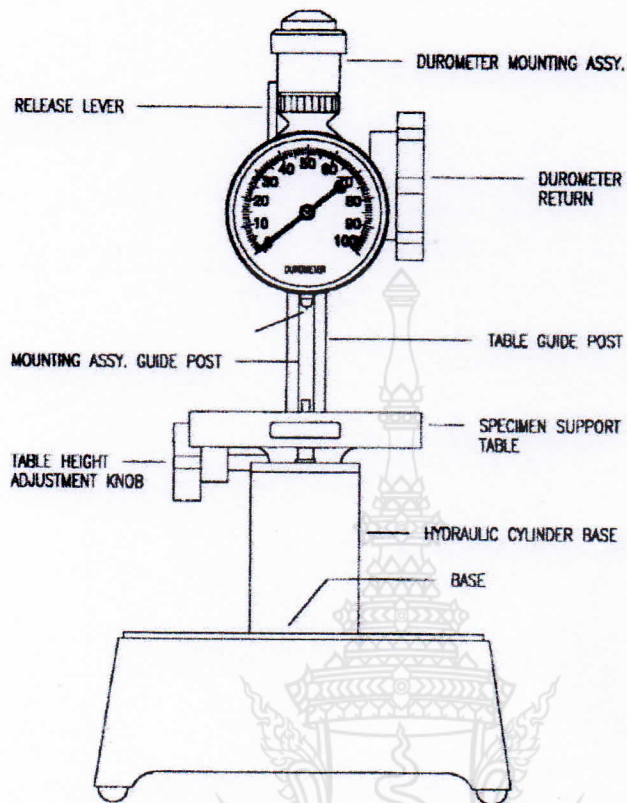
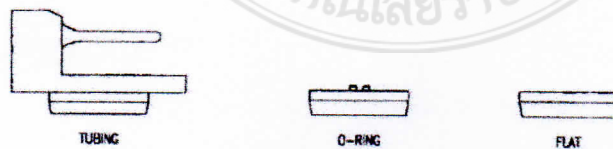
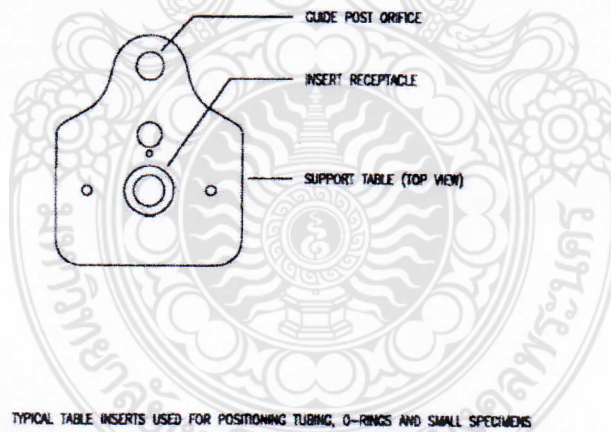
the indenter does not abruptly contact the specimen support table as damage to the indenter may result.

6. Test Specimen

6.1 The test specimen, herein referred to as "specimen" or "test specimen" interchangeably, shall be at least 6.0 mm (0.24 in.) in thickness unless it is known that results equivalent to the 6.0 mm (0.24 in.) values are obtained with a thinner specimen.

6.1.1 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 as the surfaces of the plied specimens may not be in complete contact. The lateral dimensions of the specimen shall be sufficient to permit measurements at least 12.0 mm (0.48 in.) from any edge unless it is known that identical results are obtained when measurements are made at a lesser distance from an edge.

6.1.2 The surfaces of the specimen shall be flat and parallel over an area to permit the presser foot to contact the specimen over an area having a radius of at least 6.0 mm (0.24 in.) from the indenter point. The specimen shall be suitably supported to provide for positioning and stability. *A suitable hardness*


D 2240 - 03

FIG. 2 Durometer Operating Stand

FIG. 3 Small Specimen Support Table

determination cannot be made on an uneven or rough point of contact with the indenter.

6.2 Type OOO, OOO-S, and M test specimens should be at least 1.25 mm (0.05 in.) in thickness unless it is known that

results equivalent to the 1.25 mm (0.05 in.) values are obtained with a thinner specimen.

6.2.1 A Type M specimen that is not of a configuration described in 6.2.2 may be composed of plied pieces to obtain


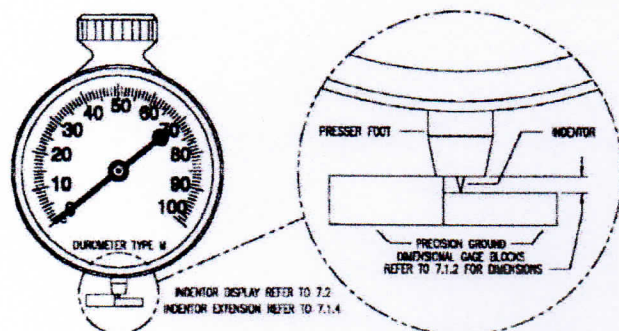
 D 2240 - 03


FIG. 4 Detail of Indentor Extension and Display Adjustment

the necessary thickness, but determinations made on such specimens may not agree with those made on solid specimens because the surfaces of the plied specimens may not be in complete contact. The lateral dimensions of the specimen should be sufficient to permit measurements at least 2.50 mm (0.10 in.) from any edge unless it is known that identical results are obtained when measurements are made at lesser distance from an edge. *A suitable hardness determination cannot be made on an uneven or rough point of contact with the indenter.*

6.2.2 The Type M specimen, when configured as an o-ring, circular band, or other irregular shape shall be at least 1.25 mm (0.05 in.) in cross sectional diameter, unless it is known that results equivalent to the 1.25 mm (0.05 in.) values are obtained with a thinner specimen. The specimen shall be suitably supported in a fixture (Fig. 3) to provide for positioning and stability.

6.3 The minimum requirement for the thickness of the specimen is dependent on the extent of penetration of the indenter into the specimen; for example, thinner specimens may be used for materials having higher hardness values. The minimum distance from the edge at which measurements may be made likewise decreases as the hardness increases.

7. Calibration

7.1 Indentor Extension Adjustment Procedure:

7.1.1 Place precision ground dimensional blocks (Grade B or better) on the support table and beneath the durometer presser foot and indenter. Arrange the blocks so that the durometer presser foot contacts the larger block(s) and the indenter tip just contacts the smaller block (Fig. 4). It is necessary to observe the arrangement of the blocks and the presser foot/indenter under a minimum of 20 \times magnification to assure proper alignment.

7.1.2 Indentor extension and shape shall be in accordance with 5.1.1.5, 5.1.1.6, or 5.1.1.7, respective to durometer type. See Fig. 1 (a through g). Examination of the indenter under 20 \times magnification, 50 \times for Type M indentors, is required to examine the indenter condition. Misshapen or damaged indentors shall be replaced.

7.1.3 A combination of dimensional gage blocks shall be used to achieve a difference of $2.54 + 0.00/-0.0254$ mm (0.100 + 0.00/-0.001 in.) between them. For Type OOO-S durometers, the gage block dimensions are $5.08 + 0.00/-0.0508$ mm (0.200 + 0.00/-0.002 in.). For Type M durometers, the gage block

dimensions are $1.27 + 0.0/-0.0127$ mm ($0.050 + 0.00/-0.0005$ in.) between them (Fig. 4).

7.1.4 Carefully lower the durometer presser foot until it contacts the largest dimensional block(s), the indenter tip should just contact the smaller block, verifying full indenter extension.

7.1.5 Adjust the indenter extension to 2.50 ± 0.04 mm (0.098 ± 0.002 in.). For Type OOO-S durometers, adjust the indenter extension to 5.0 ± 0.04 mm (0.198 ± 0.002 in.). For Type M durometers, adjust the indenter extension to 1.25 ± 0.02 mm (0.049 ± 0.001 in.), following the manufacturer's recommended procedure.

7.1.5.1 When performing the procedures in 7.1, care should be used so as not to cause damage to the indenter tip. Fig. 4 depicts a suitable arrangement for gauging indenter extension.

7.1.6 Parallelism of the durometer presser foot to the support surface, and hence the dimensional gage blocks, at the time of instrument calibration, may be in accordance with Test Method D 374, Machinist's Micrometers, or otherwise accomplished in accordance with the procedures specified by the manufacturer.

7.2 Indentor Display Adjustment:

7.2.1 After adjusting the indenter extension as indicated in 7.1, use a similar arrangement of dimensional gage blocks to verify the linear relationship between indenter travel and indicated display at two points: 0 and 100. Following the manufacturer's recommendations, make adjustments so that:

7.2.2 The indicator displays a value equal to the indenter travel measured to within:

-0.0 +1.0 durometer units measured at 0;

± 0.50 durometer units measured at 100;

± 1 durometer units at all other points delineated in 7.4.

7.2.3 Each durometer point indicated is equal to 0.025 mm (0.001 in.) of indenter travel, for Type M Durometers each indicated point is equal to 0.0125 mm (0.0005 in.).

7.2.4 The indicator shall not display a value greater than 100 or less than 0 at the time of calibration.

7.2.5 Other means of determining indenter extension or indenter travel, such as optical or laser measurement methods, are acceptable. The instrumentation used shall have traceability as described in 1.5.

7.2.6 The durometer shall be supported in a suitable fashion when performing the procedures described in 7.1 and 7.2.

7.3 Calibration device:

7.3.1 The durometer spring shall be calibrated by supporting the durometer in a calibrating device, refer to Fig. 5, in a vertical position and applying a measurable force to the indenter tip. The force may be measured by means of a balance as depicted in Fig. 5, or an electronic force cell. The calibrating device shall be capable of measuring applied force to within 0.5 % of the maximum spring force necessary to achieve 100 durometer units.

7.3.2 Care should be taken to ensure that the force is applied vertically to the indenter tip, as lateral force will cause errors in calibration. Refer to 7.1.5.1 and 7.1.6.

7.4 *Spring Calibration*—The durometer spring shall be calibrated at displayed readings of 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, and 90. The measured force (9.8 \times mass in kilograms) shall

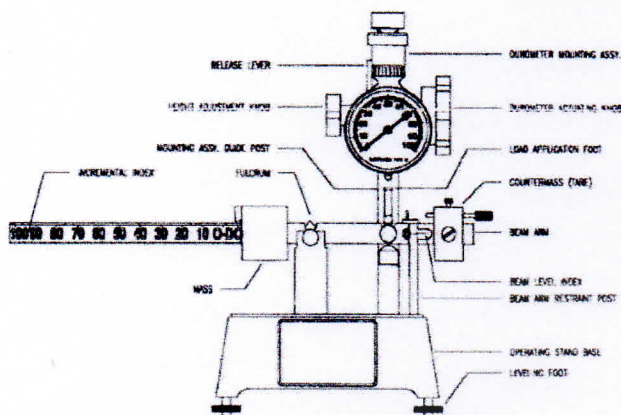

D 2240 - 03


FIG. 5 Example of Durometer Calibration Apparatus

be within the spring calibration tolerance specified in Table 1. Table 1 identifies the measured force applied to the indenter for the entire range of the instrument, although it is necessary only to verify the spring calibration at points listed herein.

7.5 Spring Calibration Procedure:

7.5.1 Ensure that the indenter extension has been adjusted in accordance with 7.1 and the linear relationship between indenter travel and display is as specified in 7.2.

7.5.2 Place the durometer in the calibration device as depicted in Fig. 5. Apply the forces indicated in Table 1 so that forces applied are aligned with the centerline of the indenter in a fashion that eliminates shock or vibration and adjust the durometer according to manufacturers' recommendations so that:

7.5.3 At the points enumerated in 7.4, the display shall indicate a value equal to 0.025 mm (0.001 in.) of indenter travel. For Type OOO-S durometers, the display shall indicate a value equal to 0.05 mm (0.002 in.) of indenter travel. For Type M durometers, the display shall indicate a value equal to 0.0125 mm (0.0005 in.) of indenter travel within the spring calibration tolerances specified in 7.6.

7.6 Spring calibration tolerances are ± 1.0 durometer units for Types A, B, C, D, E, O, and DO, ± 2.0 durometer units for Types OO, OOO, and OOO-S, and ± 4.0 durometer units for Type M, while not indicating below 0 or above 100 at the time of calibration (see Table 1).

7.7 Spring Force combinations:

For Type A, B, E, and O durometers:

$$\text{Force, } N = 0.55 + 0.075 \text{ HA}$$

Where HA = hardness reading on Type A, B, E, and O durometers.

For Type C, D, and DO durometers:

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

Where HD = hardness reading on Type C, D, and DO durometers.

For Type M durometers:

$$\text{Force, } N = 0.324 + 0.0044 \text{ HM}$$

Where HM = hardness reading on Type M durometers.

For Type OO and OOO durometers:

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

Where HOO = hardness reading on Type OO durometers.

For Type OOO-S durometers:

$$\text{Force, } N = 0.167 + 0.01765 \text{ HOOO-S}$$

Where HOOO-S = hardness reading on Type OOO-S durometers.

7.8 The rubber reference block(s) provided for checking durometer operation and state of calibration are not to be relied upon as calibration standards. The calibration procedures outlined in Section 7 are the only valid calibration procedures. The use of metal reference blocks is no longer recommended (see Note 2).

8. Laboratory Atmosphere and Test Specimen Conditioning

8.1 Tests shall be conducted in the standard laboratory atmosphere, as defined in Practice D 618, Section 4.2.

8.2 The instrument shall be maintained in the standard laboratory atmosphere, as defined in Practice D 618, Section 4.1, for 12 h prior to performing a test.

8.3 The specimen shall be conditioned in accordance with condition 40/23 exclusive of humidity control, as described in Practice D 618, Section 8.1, Procedure A and tested under the same conditions, exclusive of humidity control.

8.4 These procedures may be modified if agreed upon between laboratories or between supplier and user and are in accordance with alternative procedures identified in Practice D 618.

8.5 No conclusive evaluation has been made on durometers at temperatures other than $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). 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 *Operating Stand Operation (Type 3 Operating Stand Required for Type M):*

9.1.1 Care shall be exercised to minimize the exposure of the instrument to environmental conditions that are adverse to the performance of the instrument, or adversely affect test results.

9.1.2 Adjust the presser foot to support table parallelism as described in 5.1.2.1. It is necessary to make this adjustment each time the support table is moved to accommodate specimens of varying dimensions.

9.1.3 Prior to conducting a test, adjust the vertical distance from the presser foot to the contact surface of the test specimen to 25.4 ± 2.5 mm (01.00 ± 0.100 in.), unless it is known that identical results are obtained with presser foot at a greater or lesser vertical distance from the test specimen contact surface, or if otherwise stipulated by the manufacturer.

9.1.4 Place the specimen on the specimen support table, in a manner that the contact point of the indenter is in accordance with Section 6, unless it is known that identical results are obtained when measurements are made with the indenter at a lesser distance from the edge of the test specimen.

9.1.5 Actuate the release lever (Fig. 2) of the operating stand or activate the electromechanical device, allowing the durometer to descend at a controlled rate and apply the presser foot to the specimen in accordance with 5.1.2. In the case of "specimen to indenter" type operating stands, operate the lever

D 2240 - 03

or other mechanism to apply the specimen to the indenter in a manner that assures parallel contact of the specimen to the durometer presser foot without shock and with just sufficient force to overcome the calibrated spring force as shown in Table 1.

9.1.6 An operating stand that applies the mass at a controlled rate of descent, without shock is mandatory for Type M durometers. Hand held application or the use of a Type 1 or Type 2 operating stands for the Type M durometer is not an acceptable practice, refer to 5.1.2.4.

9.1.7 For any material covered in 1.1, once the presser foot is in contact with the specimen, for example, the initial indenter travel has ceased, the indicated reading shall be recorded within 1 ± 0.1 s, or after any period of time agreed upon among laboratories or between supplier and user. If the durometer is equipped with a maximum indicator, the maximum indicated reading shall be recorded within 1 ± 0.1 s of the cessation of indenter travel. The indicated hardness reading may change with time.

9.1.8 Make five determinations of hardness at different positions on the specimen at least 6.0 mm (0.24 in.) apart, 0.80 mm (0.030 in.) apart for Type M; and calculate the arithmetic mean, or alternatively calculate the median. The means of calculating the determinations shall be reported according to 10.2.8

9.2 Manual (Hand Held) Operation of Durometer:

9.2.1 Care shall be exercised to minimize the exposure of the instrument to environmental conditions that are adverse to the performance of the instrument, or adversely affect test results.

9.2.2 Place the specimen on a flat, hard, horizontal surface. Hold the durometer in a vertical position with the indenter tip at a distance from any edge of the specimen as described in Section 6, unless it is known that identical results are obtained when measurements are made with the indenter at a lesser distance.

9.2.3 Apply the presser foot to the specimen, maintaining it in a vertical position keeping the presser foot parallel to the specimen, with a firm smooth downward action that will avoid shock, rolling of the presser foot over the specimen, or the application of lateral force. Apply sufficient pressure to assure firm contact between the presser foot and the specimen.

9.2.4 For any material covered in 1.1, after the presser foot is in contact with the specimen, the indicated reading shall be recorded within 1 ± 0.1 s, or after any period of time agreed upon among laboratories or between supplier and user. If the durometer is equipped with a maximum indicator, the maximum indicated reading shall be recorded within 1 ± 0.1 s of the cessation of initial indenter travel. The indicated hardness reading may change with time.

9.2.5 Make five determinations of hardness at different positions on the specimen at least 6.0 mm (0.24 in.) apart and calculate the arithmetic mean, or alternatively calculate the median. The means of calculating the determinations shall be reported according to Section 10.2.8.

9.3 It is acknowledged that durometer readings below 20 or above 90 are not considered reliable. It is suggested that readings in these ranges not be recorded.

TABLE 2 Type 1 Precision—Type M Durometer Method

Material	Within Laboratories			Between Laboratories			
	MEAN	Sr ^A	r ^B	(r) ^C	SR ^D	R ^E	(R) ^F
1	31.8	1.26	3.58	11.24	3.76	10.63	33.41
2	40.8	1.14	3.23	7.90	2.47	7.00	17.13
3	54.0	0.975	2.76	5.11	2.38	6.73	12.46
4	62.8	0.782	2.21	3.52	2.24	6.34	10.10
5	70.9	0.709	2.01	2.83	0.974	2.76	3.89
6	80.6	1.686	4.77	5.92	1.61	4.56	5.65
7	87.7	1.15	3.25	3.71	2.63	7.45	8.50
8	32.4	0.947	2.68	8.26	3.64	10.29	31.73
9	41.8	0.797	2.26	5.40	2.23	6.31	15.11
10	53.3	0.669	1.89	3.55	2.29	6.49	12.17
11	63.2	0.485	1.37	2.17	2.19	6.20	9.80
12	69.6	0.737	2.09	3.00	0.99	2.80	4.02
13	78.3	0.784	2.22	2.84	1.04	2.94	3.75
14	87.6	1.121	3.17	3.62	2.65	7.49	8.55
15	34.1	0.85	2.40	7.05	1.84	5.20	15.25
16	42.3	0.635	1.80	4.25	1.20	3.39	8.01
17	54.6	0.56	1.59	2.90	2.15	6.09	11.15
18	62.9	1.12	3.17	5.04	1.47	4.16	6.61
19	70.3	0.689	1.95	2.77	0.944	2.67	3.80
20	81.7	0.483	1.37	1.67	1.10	3.10	3.80
21	87.9	0.879	2.49	2.83	2.07	5.86	6.67
AVERAGE	61.4						
POOLED VALUES		0.924	2.62	4.26	2.146	6.07	9.89

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.

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

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

^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.

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

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

9.4 Manual operation (hand held) of a durometer will cause variations in the results attained. Improved repeatability may be obtained by using a mass, securely affixed to the durometer and 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. Further improvement may be achieved by the use of a durometer operating stand which controls the rate of descent of the durometer presser foot to the test specimen and incorporates the masses described above.

10. Report

10.1 *Instrument Calibration Report (Durometer or Operating Stand):*

10.1.1 Date of calibration.

10.1.2 Date of last calibration.

10.1.3 Calibration due date (refer to Note 2).

10.1.4 Manufacturer, type, model, and serial number of the instrument, and a notation when a maximum indicator or timing device is present.

10.1.5 Values obtained (pre- and post calibration results), including a notation of the affect of a maximum indicator, if present. The method of reporting the calibrated value shall be by attaining the arithmetic mean of the determinations.

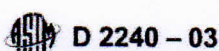
10.1.6 Ambient temperature.

10.1.7 Relative humidity.

10.1.8 Technician identification.

10.1.9 Applicable standards to which the instrument is calibrated.

10.1.10 Calibrating instrument information to include type, serial number, manufacturer, date of last calibration, calibration



D 2240 - 03

TABLE 3 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	1.56	4.41	8.59
2	65.3	0.878	2.48	3.81	2.21	6.06	9.27
3	68.0	0.433	1.23	1.80	2.28	6.45	9.49
Pooled	61.6	0.677	1.92	3.11	2.018	5.72	9.28

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.

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

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

^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.

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

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

TABLE 4 Type 1 Precision—Type D Durometer Method

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

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.

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

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

^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.

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

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

due date (refer to Note 2) and a statement of traceability of standards used to NIST or other acceptable organization. See 1.5.

10.2 Hardness Measurement Report:

10.2.1 Date of test.

10.2.2 Relative humidity.

10.2.3 Ambient temperature.

10.2.4 Manufacturer, type and serial number of the durometer or operating stand, or both, including a notation when a maximum indicator or timing device is present, date of last calibration, and calibration due date (refer to Note 2).

NOTE 2—The calibration interval (calibration due date) for a durometer is to be determined by the user, based upon frequency of use, severity of conditions, environmental factors, and other variables.

Periodic checking of the operation and state of durometer calibration using commercially available rubber test blocks (refer to 7.8), specifically designed for this purpose, is recommended.

An instrument that has been exposed to severe shock, is visibly damaged, produces test determinations more than 2 points different from calibrated rubber test blocks or other reference standard, or is otherwise suspected of unreliability, should be removed from service and returned to a qualified calibration facility.

A calibration interval of one year is recommended for durometer test blocks and durometer instruments that are infrequently used, more often for others.

The calibration interval for instruments and peripheral devices employed in the calibration of durometers is to be determined by the calibration service provider. It is recommended that the protocols outlined in ISO/IEC 17025⁶, as required by the manufacturer, and those to which the service is provided, be followed.

10.2.5 Means of testing, whether manual (hand held), Type 1 operating stand (specimen to indenter), Type 2 operating stand (indenter to specimen type), or Type 3 operating stand (electromechanical or hydraulically dampened).

10.2.6 Description of test specimen, including thickness, number of pieces plied if less than the thickness indicated in Section 6, including the vulcanization date.

10.2.7 Complete identification of material tested.

10.2.8 Hardness value obtained and method of calculation, either arithmetic mean or alternatively, the median.

10.2.9 Indentation hardness time interval at which determination was made. Readings may be reported in the form: M/60/1 where M is the type of durometer, 60 the reading, and 1 the time in seconds that the presser foot is in contact with the specimen or from an electronic timing device.

11. Precision and Bias

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 the Type M method was determined from an interlaboratory program with 21 materials of varying hardness, with six participating laboratories. Tests were conducted on two separate days in each laboratory for the Type M testing program. All materials were supplied from a single source, being those commonly supplied as reference materials with the instruments from the manufacturer.

11.3 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.

11.4 The Type 1 precision for both Type A and D methods was determined from an interlaboratory program with 3 materials of varying hardness, with six participating laboratories. Tests were conducted on two separate days in each laboratory for both A and D testing programs. All materials were supplied from a single source.

11.5 A test result for hardness, for Types A, D, and M, was the median of five individual hardness readings on each day in each laboratory.


11.6 Table 2 shows the precision results for Type M method,⁸ Table 3 shows the precision results for Type A method,⁹ and Table 4 gives the precision results for Type D method.⁹

11.7 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 Table 1 closest to the mean level under consideration (at any given time, for any given material) in routine testing operations.

NOTE 3—A Type 1 precision statement for Types E, OOO, OOO-S, and R have not yet been made available.

⁸ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: D11-1091.

⁹ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: D11-1029.


D 2240 - 03

11.7.1 *Repeatability*—The repeatability, r , of these test methods has been established as the appropriate value tabulated in Tables 2-4. 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 non-identical sample populations.

11.7.2 *Reproducibility*—The reproducibility, R , of these test methods has been established as the appropriate value tabulated in Tables 2-4. Two single test results obtained 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 non-identical sample populations.

11.7.3 Repeatability and reproducibility are 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.

11.8 *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.

12. Keywords

12.1 durometer; durometer hardness; hardness; indentation hardness; micro durometer hardness

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

XI. DUROMETER SELECTION GUIDE

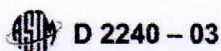
X1.1 The durometer selection guide is designed to assist in the selection of the proper durometer type for various applications.

X1.2 It is generally recognized that durometer hardness determination below 20 and above 90 are unreliable. It is recommended that the next lower or higher type (scale) be used in these situations.

X1.3 It is also recommended that, whenever possible, an operating stand be employed in performing durometer hardness tests.

TABLE X1.1 Durometer Selection: Typical Uses

Type (Scale)	Typical Examples of Materials Tested	Durometer Hardness (Typical Uses)
A	Soft vulcanized rubber, natural rubber, nitriles, thermoplastic elastomers, flexible polyacrylics and thermosets, wax, felt, and leathers	20-90 A
B	Moderately hard rubber, thermoplastic elastomers, paper products, and fibrous materials	Above 90 A Below 20 D
C	Medium-hard rubber, thermoplastic elastomers, medium-hard plastics and thermoplastics	Above 90 B Below 20 D
D	Hard rubber, thermoplastic elastomers, harder plastics, and rigid thermoplastics	Above 90 A
DO	Moderately hard rubber, thermoplastic elastomers, and very dense textile windings	Above 90 C Below 20 D
M	Thin, irregularly shaped rubber, thermoplastic elastomer, and plastic specimens	20-85 A
O	Soft rubber, thermoplastic elastomers, very soft plastics and thermoplastics, medium-density textile windings	Below 20 DO
OO	Extremely soft rubber, thermoplastic elastomers, sponge, extremely soft plastics and thermoplastics, foams, low-density textile windings, human and animal tissue	Below 20 O
CF	Composite foam materials such as amusement ride safety cushions, vehicle seats, dashboards, headrests, armrests, and door panels	See Test Method F 1957



D 2240 – 03

X2. RELATED TEST METHODS

C 367 Test Methods for Strength Properties of Prefabricated Architectural Acoustical Tile or Lay-In Ceiling Panels¹⁰

C 473 Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products¹¹

C 581 Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service¹²

C 661 Test Method for Indentation Hardness of Elastomeric-Type Sealants by Means of a Durometer¹³

C 836 Specification for High Solids Content, Cold Liquid-Applied Elastomeric Waterproofing Membrane for Use with Separate Wearing Course¹³

D 461 Test Methods for Felt¹⁴

D 531 Test Method for Rubber Property—Pusey and Jones Indentation⁴

D 619 Test Methods for Vulcanized Fibre Used for Electrical Insulation²

D 1037 Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials¹⁵

D 1054 Test Method for Rubber Property—Resilience Using a Rebound Pendulum⁴

D 1414 Test Methods for Rubber O-Rings¹⁶

D 1474 Test Methods for Indentation Hardness of Organic Coatings¹⁷

D 2134 Test Method for Determining the Hardness of Organic Coatings with a Sward-Type Hardness Rocker¹⁷

D 2287 Specification for Nonrigid Vinyl Chloride Polymer and Copolymer Molding and Extrusion Compounds³

D 2583 Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor¹⁸

D 2632 Test Method for Rubber Property—Resilience by Vertical Rebound⁴

D 4289 Test Method for Elastomer Compatibility of Lubricating Greases and Fluids¹⁹

D 5672 Test Method for Testing Flexible Cellular Materials—Measurement of Indentation Force Deflection Using a 25-mm (1-in.) Deflection Technique²⁰

D 6546 Test Methods for and Suggested Limits for Determining Compatibility of Elastomer Seals for Industrial Hydraulic Fluid Applications²¹

F 1151 Test Method for Determining Variations in Hardness of Film Ribbon Pancakes²²

NOTE X2.1—The hardness testing of other nonmetallic materials may be under the jurisdiction of one or more ASTM committees; the respective committee should be contacted for specific information.

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

¹¹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

¹² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.04.

¹³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.07.

¹⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 07.01.

¹⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.10.

¹⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.02.

¹⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

¹⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

¹⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.02.

²⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

²¹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.04.

²² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.09.

ASTM International 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 International 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, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: D7136/D7136M – 12

Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event¹

This standard is issued under the fixed designation D7136/D7136M; 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 determines the damage resistance of multidirectional polymer matrix composite laminated plates subjected to a drop-weight impact event. The composite material forms are limited to continuous-fiber reinforced polymer matrix composites, with the range of acceptable test laminates and thicknesses defined in 8.2.

1.1.1 Instructions for modifying these procedures to determine damage resistance properties of sandwich constructions are provided in Practice D7766/D7766M.

1.2 A flat, rectangular composite plate is subjected to an out-of-plane, concentrated impact using a drop-weight device with a hemispherical impactor. The potential energy of the drop-weight, as defined by the mass and drop height of the impactor, is specified prior to test. Equipment and procedures are provided for optional measurement of contact force and velocity during the impact event. The damage resistance is quantified in terms of the resulting size and type of damage in the specimen.

1.3 The test method may be used to screen materials for damage resistance, or to inflict damage into a specimen for subsequent damage tolerance testing. When the impacted plate is tested in accordance with Test Method D7137/D7137M, the overall test sequence is commonly referred to as the Compression After Impact (CAI) method. Quasi-static indentation per Test Method D6264/D6264M may be used as an alternate method of creating damage from an out-of-plane force and measuring damage resistance properties.

1.4 The damage resistance properties generated by this test method are highly dependent upon several factors, which include specimen geometry, layup, impactor geometry, impactor mass, impact force, impact energy, and boundary conditions. Thus, results are generally not scalable to other configurations, and are particular to the combination of geometric and physical conditions tested.

1.5 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in

each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.5.1 Within the text the inch-pound units are shown in brackets.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, 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:²

- D792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
- D883 Terminology Relating to Plastics
- D3771 Specification for Rubber Seals Used in Concentrating Solar Collectors
- D3763 Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors
- D3878 Terminology for Composite Materials
- D5229/D5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials
- D5678 Test Method for Freeze/Thaw Resistance of Wax Emulsion Floor Polish
- D6264/D6264M Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force
- D7137/D7137M Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates
- D7766/D7766M Practice for Damage Resistance Testing of Sandwich Constructions
- E4 Practices for Force Verification of Testing Machines
- E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
- E18 Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.05 on Structural Test Methods.

Current edition approved April 1, 2012. Published May 2012. Originally approved in 2005. Last previous edition approved in 2007 as D7136/D7136M - 07. DOI: 10.1520/D7136_D7136M-12.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

E122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E456 Terminology Relating to Quality and Statistics

E1309 Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases

E1434 Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases

E2533 Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications

2.2 Military Standards:

MIL-HDBK-17-3F Composite Materials Handbook, Volume 3—Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design and Analysis³

MIL-HDBK-728/1 Nondestructive Testing⁴

MIL-HDBK-731A Nondestructive Testing Methods of Composite Materials—Thermography⁴

MIL-HDBK-732A Nondestructive Testing Methods of Composite Materials—Acoustic Emission⁴

MIL-HDBK-733A Nondestructive Testing Methods of Composite Materials—Radiography⁴

MIL-HDBK-787A Nondestructive Testing Methods of Composite Materials—Ultrasonics⁴

NASA Reference Publication 1092 Standard Tests for Toughened Resin Composites, Revised Edition, July 1983⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology **D3878** defines terms relating to composite materials. Terminology **D883** defines terms relating to plastics. Terminology **E6** defines terms relating to mechanical testing. Terminology **E456** and Practice **E177** define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology **D3878** shall have precedence over the other standards.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental dimensions, shown within square brackets: $[M]$ for mass, $[L]$ for length, $[T]$ for time, $[\theta]$ for thermodynamic temperature, and $[nd]$ for non-dimensional quantities. Use of these symbols is restricted to analytical dimensions when used with square brackets, as the symbols may have other definitions when used without the brackets.

3.2.2 *dent depth, d $[L]$, n* —residual depth of the depression formed by an impactor after the impact event. The dent depth shall be defined as the maximum distance in a direction normal

to the face of the specimen from the lowest point in the dent to the plane of the impacted surface that is undisturbed by the dent.

3.2.3 *nominal value, n* —a value, existing in name only, assigned to a measurable property for the purpose of convenient designation. Tolerances may be applied to a nominal value to define an acceptable range for the property.

3.2.4 *principal material coordinate system, n* —a coordinate system with axes that are normal to the planes of symmetry inherent to a material.

3.2.4.1 *Discussion*—Common usage, at least for Cartesian axes (123 , xyz , and so forth), generally assigns the coordinate system axes to the normal directions of planes of symmetry in order that the highest property value in a normal direction (for elastic properties, the axis of greatest stiffness) would be 1 or x , and the lowest (if applicable) would be 3 or z . Anisotropic materials do not have a principal material coordinate system due to the total lack of symmetry, while, for isotropic materials, any coordinate system is a principal material coordinate system. In laminated composites, the principal material coordinate system has meaning only with respect to an individual orthotropic lamina. The related term for laminated composites is “reference coordinate system.”

3.2.5 *recorded contact force, F $[MLT^{-2}]$, n* —the force exerted by the impactor on the specimen during the impact event, as recorded by a force indicator.

3.2.6 *reference coordinate system, n* —a coordinate system for laminated composites used to define ply orientations. One of the reference coordinate system axes (normally the Cartesian x -axis) is designated the reference axis, assigned a position, and the ply principal axis of each ply in the laminate is referenced relative to the reference axis to define the ply orientation for that ply.

3.2.7 *striker tip, n* —the portion or component of the impactor which comes into contact with the test specimen first during the impact event.

3.3 Symbols:

A = cross-sectional area of a specimen

C_F = specified ratio of impact energy to specimen thickness

CV = coefficient of variation statistic of a sample population for a given property (in percent)

D = damage diameter (see Fig. 11)

d = dent depth

E = potential energy of impactor prior to drop

E_t = absorbed energy at the time at which force versus time curve has a discontinuity in force or slope

E_a = energy absorbed by the specimen during the impact event

E_i = actual impact energy (incident kinetic energy)

E_{max} = absorbed energy at the time of maximum recorded contact force

F = recorded contact force

F_1 = recorded contact force at which the force versus time curve has a discontinuity in force or slope

F_{max} = maximum recorded contact force

g = acceleration due to gravity

h = specimen thickness

H = impactor drop height

³ Available from U.S. Army Research Laboratory, Materials Directorate, Aberdeen Proving Ground, MD 21001.

⁴ Available from U.S. Army Materials Technology Laboratory, Watertown, MA 02471.

⁵ Available from National Aeronautics and Space Administration (NASA), Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199.

การทดสอบสภาพนำความร้อนของ ฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต

กรรทพิยั เตมเกาะ *

ฉนวนกันความร้อนสามารถช่วยป้องกันการส่งผ่านพลังงานความร้อนจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งควรจะเป็นวัสดุที่เบา ประกอบด้วยฟองอากาศหรือรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก มีคุณสมบัติในการกักเก็บพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านไว้ภายในทำให้ด้านทานการส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

แม้ว่าฉนวนกันความร้อนมีคุณสมบัติที่ดีในการต้านทานความร้อน แต่ยังมีขาดคุณสมบัติทางด้านกายภาพอื่น ๆ เช่น ความแข็งแรง ดังนั้นจึงมีการผลิตฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการรวมตัวกันของวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วัสดุนั้นอาจจะผสมเป็นเนื้อเดียวกันหรือใช้เทคนิคการลามิเนตให้เป็นชั้นเดียวกัน เช่น ไฟเบอร์กลาส หรือแมกนีเซียมบอร์ดที่มีโฟมโพลีสไตรีนแบบขยายตัว (Expanded polystyrene, EPS) เป็นแกน เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเป็นฉนวนและยังมีความแข็งแรงด้วย รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต

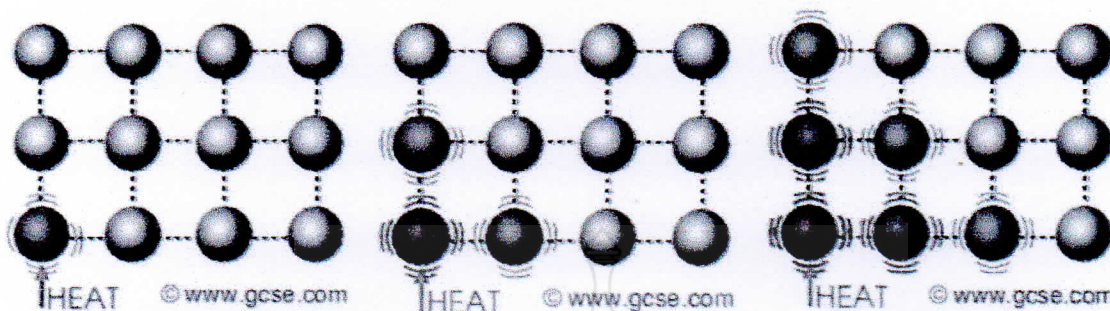
การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) สามารถเกิดขึ้นได้ 3 ทาง คือ การพาความร้อน (Convection), การนำความร้อน (Conduction) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยที่ความร้อนจะไหลจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ กระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจเกิดขึ้นได้จากกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งใน 3 ทางนี้หรือเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 3 ทาง ซึ่งวัสดุต่าง ๆ มีความสามารถในการนำความร้อนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเนื้อสารของวัสดุนั้น ๆ ทั้งนี้รวมถึงลักษณะการเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลเล็กๆภายในวัสดุนั้น ๆ ด้วย การนำความร้อนถือว่ามีค่าสำคัญมาก

กับวัสดุที่เป็นของแข็ง เมื่อวัสดุได้รับพลังงานความร้อนอะตอมที่ได้รับความร้อนจะเกิดการสั่นสะเทือนและชนกับอะตอมที่อยู่ข้าง ๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมที่อยู่ติดกันต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่อนุภาคจะไม่เคลื่อนที่แต่พลังงานความร้อนเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวชิดกัน การถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างโมเลกุลทำได้ง่ายกว่าวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวห่างกัน วัสดุที่มีความสามารถนำความร้อนได้ดี เรียกว่า ตัวนำความร้อน เช่น เงิน ทองแดง ส่วนวัสดุที่นำความร้อนได้ต่ำ เรียกว่า ฉนวนกันความร้อน เช่น ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโฟม และฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต (Composite insulation materials) เป็นต้น



รูปที่ 1 ฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต

* นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม วศ.



รูปที่ 2 ขั้นตอนการถ่ายเทความร้อนเมื่ออนุภาคได้รับความร้อน โมเลกุลสั่นสะเทือนและถ่ายเทพลังงานให้โมเลกุลที่อยู่ติดกัน

• หลักการวัดค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)

วัสดุใดมีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีหรือไม่นั้น เราสามารถพิจารณาได้จากค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity, K-Value) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ โดยวัดค่าอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ($W/m.K$) นอกจากนี้ความเป็นฉนวนกันความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance, R-Value) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาต่อค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็นตารางเมตร - เคลวิน ต่อวัตต์ ($m^2.K/W$) ฉนวนกันความร้อนที่ดีต้องมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง ค่าสภาพนำความร้อน (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad \text{หน่วย วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K)} \quad (1)$$

โดย k = สภาพนำความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ($W/m.K$)

Q = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วย วัตต์ (W)

A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วย ตารางเมตร (m^2)

L = ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วย เมตร (m)

ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วย เคลวิน (K)

ค่าความต้านทานความร้อน (R) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$R = \frac{L}{k} \quad \text{หน่วย ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ (m}^2.K/W) \quad (2)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U-value) คือส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$U = \frac{1}{R} \quad \text{หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน (W/m}^2.K) \quad (3)$$

• การทดสอบแบบ Heat Flow Meter

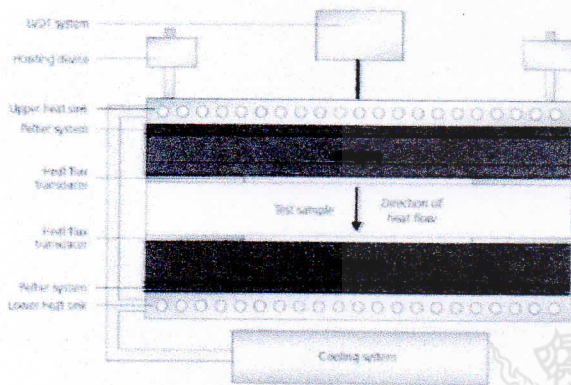
การทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อน แบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BS EN 12667 และ JIS A 1412 ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนคือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3 (a)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ในสถานะแวดล้อมที่อุณหภูมิ $22 \pm 5^\circ C$ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 10 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง โดยมวลของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบโดยวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3 (b) จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิให้แตกต่างกัน (ΔT) ระหว่างแผ่นอุณหภูมิความร้อนและแผ่นความเย็น ภายในเครื่องทดสอบมีฉนวนล้อมรอบตลอดแนวความหนาของแผ่นอุณหภูมิและชิ้นทดสอบเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก



เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ที่ติดอยู่กับผิวของแผ่นอุณหภูมิทั้งสองโดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นทั้งสอง เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state condition) กรมวิทยาศาสตร์บริการให้บริการทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนสำหรับฉนวนกัน

ความร้อนคอมโพสิต ด้วยเครื่อง NETZSCH HFM 436 เป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter โดยตัวอย่างต้องมีขนาด กว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และความหนาอยู่ในช่วง 6 - 80 มิลลิเมตร ผู้สนใจสามารถติดต่อสอบถามและขอรับบริการได้ที่โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400



รูปที่ 3 (a) การออกแบบเครื่องมือวัดแบบ Heat Flow Meter, (b) เครื่อง HFM 436/3 Lambda ที่ใช้หลักการแบบ Heat Flow Meter

เอกสารอ้างอิง

American Society for Testing and Material. Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus.

In *Annual book of ASTM standard*. Vol. 04.06. West Conshohocken : ASTM , 2010, p.152-166.

Conduction in Non-Metals. [Online] [cite dated 20 April 2012] Available from Internet : <http://www.gcse.com/energy/conduction.htm>

Heat transfer. [Online] [cite dated 20 April 2012] Available from Internet :

http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer

Netzsch. Operating Instructions: heat flow meter HFM 436/3 Lambda. Wittelsbacherstrbe : Netzsch, 2008.

ภาคผนวก ค.

ขั้นตอนการผลิตวัสดุผนังหลังคา



ขั้นตอนการผลิตวัสดุผนังหลังคา

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
<p>1.เตรียมอลูมิเนียมฟอยล์</p> 	<p>นำอลูมิเนียมฟอยล์เนื้อหยาบ มาเข้าในแบบอัดร้อนของเครื่องนั้นๆ ภายในเครื่องอัดร้อน สามารถอัดได้ครั้งละหลายๆบล็อกได้ แต่ครั้งนี้ จะเตรียมไว้ 10 แผ่น</p>
<p>2.คลุมพลาสติก</p> 	<p>นำพลาสติก Polyethylene terephthalate (PET) / พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต คลุมบนผิวด้านหน้า เพื่อไม่ให้อลูมิเนียมฟอยล์ปลิวออกจากบล็อกอัดงาน</p>
<p>3.ทำการอัดเป็นแผ่น</p> 	<p>นำงานที่เตรียมไว้ทั้ง 10 แผ่น เข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที</p>
<p>4.ขึ้นลอนและตัดให้ได้ขนาด</p> 	<p>เมื่อนำออกจากเครื่องอัดร้อนแล้ว อย่าปล่อยให้เย็นนาน ทำการตัดลอน แล้วจึงทำการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน</p>

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
<p data-bbox="395 280 639 320">5.ผลิตภัณฑ์มุงหลังคา</p> 	<p data-bbox="821 280 1398 539">จะได้เป็นผลิตภัณฑ์หลังคาแผ่นลอน ขนาด กว้าง 99 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร ราคาผลิตภัณฑ์ 480 บาท/แผ่น น้ำหนักต่อแผ่น 16 กิโลกรัม เมื่อเทียบกับแผ่นกระเบื้องมุงหลังคาขนาดมาตรฐาน 1.20 เมตร จะมีน้ำหนัก 3.50 กิโลกรัม</p>

