



ศึกษาสมบัติของแผ่นมุงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิล

Study the Properties of Roofing Sheets from
Recycled Materials

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รำพึง เจริญยศ

นายสุทธิสาร อนันตรัตนชัย

ศึกษาสมบัติของแผ่นมุงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รำพึง เจริญยศ
อาจารย์สุทธิสาร อนันตรัตนชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ปีการศึกษา 2557

Study the Properties of Roofing Sheets from Recycled Materials

Asst. Prof. Rampueng Jaroenyot

Mr. Suttisan Anuntaratanchai

Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering and Architecture
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Academic Year 2014

ชื่อโครงการวิจัย	การสร้างผลิตภัณฑ์โครงสร้างรังผึ้งจากกระดาษผสมพอลิเมอร์
ชื่อผู้วิจัย	1. ผศ.รพีพงศ์ เจริญยศ 2. นายสุทธิสาร อนันตรัตนชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสมรีไซเคิลจากกล่องนม UHT ที่ใช้มุงหลังคา ที่ได้มาจากการแยกเยื่อกระดาษออกจากกล่องเครื่องดื่ม UHT เพื่อให้ได้วัสดุผสม อลูมิเนียมฟอยล์ที่เคลือบผสมด้วยพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้และเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดจำนวนกล่องเครื่องดื่ม UHT ที่เหลือใช้มาทำเป็นแผ่นมุงหลังคา

ในการทดลองวัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์ที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดใหญ่ (60 มม.) ปานกลาง (45 มม.) และเล็ก (25 มม.) โดยจะทำการคัดแยกขนาดแล้วนำไปอัดร้อนเป็นแผ่นจากนั้นก็ทำการตัดเป็นชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องตัดเลื่อยวงเดือน เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพตามมาตรฐานในการทดสอบชิ้นงาน ได้แก่ การทดสอบความแข็ง (ASTM D 785) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักและการยืดหยุ่น (ASTM D 143) การทดสอบความหนาแน่น (ASTM D 792) การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ (ASTM 1037-99) การทดสอบหาค่าการพองตัวด้านความหนา (ASTM D 792) ความต้านแรงดึงดึงฉากกับผิวหน้า (ASTM D 638) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆทั้งทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสม ที่มีขนาดของชิ้นวัสดุผสมที่แตกต่างกัน เพื่อนำวัสดุผสมที่มีสมบัติดีที่สุดไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

ในการศึกษาสมบัติวัสดุผสมรีไซเคิล จากกล่องเครื่องดื่ม UHT เพื่อใช้ทำแผ่นมุงหลังคา จากการทดสอบทางกลพบว่าวัสดุผสมชิ้นขนาดใหญ่ มีสมบัติทางกลดีที่สุด เนื่องจากชิ้นวัสดุผสม อลูมิเนียมฟอยล์กับพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ ที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถรับแรงได้สูงกว่า อีกทั้งการยืดตัวสูงและมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือ มีช่องว่างของโครงสร้างมาก ทำให้มีการพองตัว มีค่าความหนาแน่นต่ำและการดูดซึมน้ำสูงกว่าวัสดุผสมที่มีขนาดเล็ก

Research Name Construction of a honeycomb structural product from the polymer-paper composite

Researcher Name Asst. Prof. Rampueng Jaroenyot
 Mr. Suttisan Anuntaratanachai

Major Field Industrial Engineering

Academic Year 2014

ABSTRACT

This Project aims to study mechanical properties and physical properties of roofing materials made of paper tissue from UHT drinking cartons in order to produce low density of aluminium foil mixed with polyethylene that can be used in engineering work. In addition, being used as the roofing materials can be one choice to reduce the amount of UHT drinking cartons.

In the experimental stage the aluminium foil with rough texture (60 mm.), moderate (45 mm.) and worsted (25 mm.) was used in the project. Each of aluminium foil was sorted and then was heated and pressed. Next, it was cut into pieces for testing of mechanical and physical properties based on the standard properties given. To compare the mechanical properties and the physical of the different sizes of aluminium foil and to produce the best roofing materials, the following were tested, strength testing (ASTM D 785), fractional Modulus of Rupture (MOR), Modulus of Elasticity (MOE) (ASTM D 143), density testing (ASTM D 792), water absorption testing (ASTM 1037-99), swelling in thickness testing (ASTM D 792), tensile resistance locating with surface (ASTM D 638).

To study the properties of recycled materials. The soft drink UHT sheet for roofing. From mechanical tests showed that aluminum foil coarse. With the best mechanical properties. The aluminum foil is large, it can withstand higher. The elongation and hardness than aluminum foil is small. The disadvantage is the very structure of space. Therefore the swelling low density and high water absorption.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการ ศึกษาสมบัติของแผ่นมุงหลังคา ทำจากวัสดุรีไซเคิล เพื่อทดสอบหาสมบัติของวัสดุนี้ว่ามีประสิทธิภาพที่ใช้ได้ดีมากน้อยเพียงใด เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากท่านผู้มีอุปการคุณหลายๆ ท่านซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในด้านต่างๆ

ในการดำเนินโครงการในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ให้คำปรึกษา อาจารย์แผนกวิศวกรรมอุตสาหการ และ บริษัท ไฟเบอร์พัส จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ จนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการทำวิจัย รวมถึงบุคคลอีกหลายๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวเอ่ยนามที่ช่วยผลักดันให้สามารถมีแรงในการดำเนินโครงการวิจัยนี้จนประสบผลสำเร็จ

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งที่จะให้โครงการนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจในการนำไปศึกษาและพัฒนาให้โครงการวิจัยนี้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

คณะผู้จัดทำ

ร่ำพึง เจริญยศ

สุทธิสาร อนันตรัตนชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญแผนภูมิ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ	5
2.1 นิยามศัพท์	5
2.2 แนวคิด	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.4 การรีไซเคิล	10
2.5 กล้องเครื่องคั้ม	11
2.6 วัสดุผสม(Composite)	12
2.7 อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)	25
2.8 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	29
2.9 การผสม (Mixing)	34
2.10 กระบวนการอัดขึ้นรูป	37
2.11 การทดสอบทางกล	50
2.12 การทดสอบทางกายภาพ	73
2.13 การประเมินผล	76

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงาน	77
3.1 การวางแผน	77
3.2 การเตรียมการ	80
3.3 การออกแบบการทดลอง	85
3.4 การดำเนินงาน	86
3.5 การทดสอบชิ้นงาน	91
3.6 การผลิตวัสดุถุงหลังคา	100
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลดำเนินงาน	102
4.1 การวิเคราะห์ผลดำเนินงาน	102
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	117
5.1 สรุปผล	117
5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ	118
5.3 ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม	120
ภาคผนวก ก.	124
ผลการทดลอง	125
ภาคผนวก ข.	134
คู่มือมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	135
ภาคผนวก ค.	150
ขั้นตอนการผลิตวัสดุถุงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิล	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene	33
2.2 สเกลการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell	53
2.3 วิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ	54
2.4 ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ	57
2.5 สเกลความแข็งของมอร์ (Mohs' Scale)	64
2.6 สูตรการคำนวณในการกระชงแรงคังอแบบ 3 จุด	67
2.7 สูตรการคำนวณในการกระชงแรงคังอแบบ 4 จุด	69
2.8 แสดงระบบของของเหลวที่แนะนำไว้สำหรับทดสอบหาค่าความหนาแน่น	74
3.1 แผนการดำเนินโครงการ	78
3.2 การออกแบบจำนวนชิ้นการทดลองทั้งหมด	86
4.1 ผลการทดสอบความแข็งจาก ตารางภาคผนวก ก.1	102
4.2 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การแตกหักจากตารางภาคผนวก ก.2	104
4.3 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นจากตารางภาคผนวก ก.2	106
4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงคังตั้งฉากกับผิวหน้าจากตารางภาคผนวก ก.3	107
4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นจากตารางภาคผนวก ก.4	109
4.6 ผลการทดสอบการพองตัวด้านความหนาจากตารางภาคผนวก ก.5	110
4.7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำจากตารางภาคผนวก ก.6	112
4.8 ผลการทดสอบทั้งหมด	113
5.1 สมบัติของแผ่นมุงหลังคา ทำจากวัสดุรีไซเคิล	118

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	กล่องUHT	12
2.2	ชั้นของกล่อง UHT	12
2.3	ประเภทของวัสดุคอมโพสิต	15
2.4	ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต	16
2.5	แผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิต	16
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_f และความยาวของเส้นใย	19
2.7	แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ	20
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย	21
2.9	คอมโพสิตแบบชั้น	24
2.10	อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)	26
2.11	อลูมิเนียมฟอยล์ แบบฟอยล์สองหน้า	27
2.12	อลูมิเนียมฟอยล์ - ฟิล์ม (Aluminium Foil – Film)	28
2.13	แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แบบหน้าเดียว	29
2.14	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	32
2.15	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)	33
2.16	เครื่องผสมแบบถังหมุนปกติ	35
2.17	เครื่องผสมแบบถังหมุนแบบกรวยคู่ (Double Cone Mixer)	35
2.18	เครื่องผสมแบบถังหมุนแบบรูปตัววี (V-Shape Mixer)	35
2.19	เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon Blender)	36
2.20	เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical Screw Mixer)	36
2.21	เครื่องผสมเทอร์บูเลนต์ (Turbulent Mixer)	37
2.22	การขึ้นรูปแบบ Blow Molding	39
2.23	การขึ้นรูปแบบการเป่ายืด Stretch Blow Molding	41
2.24	กระบวนการฉีด (Injection Molding)	43
2.25	ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)	44
2.26	ลักษณะเครื่องอัดและการขึ้นรูปแบบกระบวนการอัด(Compress Molding)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Blown Film	47
2.28 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Sheet/Film Extrusion	47
2.29 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Pipe/Tube/Profile Extrusion	48
2.30 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Tape Yarn/Filament	48
2.31 การขึ้นรูปแบบใช้ลมอัด (Blow Forming)	49
2.32 การขึ้นรูปแบบใช้แรงดูดสูญญากาศ (Vacuum Forming)	49
2.33 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	50
2.34 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell พร้อมหัวกด	52
2.35 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง Hardness แบบ Rockwell	56
2.36 Rockwell Hardness Tester	56
2.37 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell	58
2.38 หัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็ง Brinell	59
2.39 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers	61
2.40 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Knoop	62
2.41 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore	63
2.42 หลักการทดสอบความต้านทานแรงดึงและการหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก	66
2.43 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด	67
2.44 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด	68
2.45 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (MOR)	70
2.46 โมดูลัสความยืดหยุ่น	71
2.47 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	72
2.48 ตัวอย่างคอลัมน์สำหรับทดสอบแบบ Density Gradient Technique	73
3.1 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	80
3.2 เครื่องขัดแยกเยื่อกระดาษและอลูมิเนียมฟอยล์	80
3.3 เลื่อยวงเดือน	81
3.4 เครื่องขึ้นพลาสติก	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 ตะแกรงสำหรับแยกขนาด	81
3.6 เครื่องทดสอบแรงดัด	82
3.7 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกด	83
3.8 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ	83
3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นของวัสดุ	83
3.10 ตลับเมตร	84
3.11 เวอร์เนียคาลิเปอร์	84
3.12 ไมโครมิเตอร์	84
3.13 กล้องเครื่องคัมประเภท UHT ที่เหลือใช้	84
3.14 การปั่นกระดาษที่มาจากกลองนมให้ละเอียด	87
3.15 แผ่นผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกที่ได้จากกลอง UHT	87
3.16 การบดย่อยแผ่นวัสดุผสม	88
3.17 วัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ขนาดใหญ่	88
3.18 วัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ขนาดกลาง	89
3.19 วัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ขนาดเล็ก	89
3.20 การวางวัสดุผสมที่ทำเป็นชิ้นเล็กๆแล้วบนแผ่นเหล็ก	89
3.21 นำเข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180°C	90
3.22 แผ่นชิ้นงานของอลูมิเนียมฟอยล์ขนาดต่างๆ	90
3.23 แผ่นชิ้นงานทดสอบ ขนาด 50× 50 ×8 mm.	90
3.24 แผ่นชิ้นงานทดสอบ ขนาด 50× 150 ×8 mm.	91
3.25 เตรียมชิ้นงานในการทดสอบความแข็ง	91
3.26 ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน	92
3.27 รอยกดจากการทดสอบความแข็ง	92
3.28 เตรียมชิ้นสำหรับทดสอบในการค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น MOE	93
3.29 เริ่มการทดสอบการค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น MOE	93
3.30 การทดสอบ MOE และ MOR	93
3.31 ชิ้นทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.32 การดึงชิ้นงาน	94
3.33 การแยกจากก๊วยของชิ้นทดสอบ	95
3.34 ชิ้นทดสอบความหนาแน่น	95
3.35 เครื่องทดสอบความหนาแน่น	96
3.36 ชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำและการพองตัวด้านความหนา	96
3.37 การวัดความหนาก่อนแช่น้ำ	97
3.38 การแช่น้ำ	97
3.39 การวัดหลังแช่น้ำ	97
3.40 ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดด้วยใบตัดเพชร	98
3.41 การเตรียมชิ้นงานในการส่องโครงสร้าง	98
3.42 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	98
3.43 ติดชิ้นงานกับฐานรองรับชิ้นงาน	99
3.44 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแล้ว	99
3.45 เครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM)	99
3.46 แผ่นหลังคาลอน ผลิตจากวัสดุผสม ไร้โซลิต ประเภทกล่อง UHT	100
4.1 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 35 เท่า	114
4.2 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 100 เท่า	114
4.3 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 200 เท่า	114
4.4 เนื้อวัสดุผสมขนาดกลาง กำลังขยาย 35 เท่า	115
4.5 เนื้อวัสดุผสมขนาดกลาง กำลังขยาย 100 เท่า	115
4.6 เนื้อวัสดุผสมขนาดกลาง กำลังขยาย 200 เท่า	115
4.7 เนื้อวัสดุผสมขนาดเล็ก กำลังขยาย 35 เท่า	116
4.8 เนื้อวัสดุผสมขนาดเล็ก กำลังขยาย 100 เท่า	116
4.9 เนื้อวัสดุผสมขนาดเล็ก กำลังขยาย 200 เท่า	116

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่	หน้า
2.1 กระบวนการเป่า (Blow Molding)	39
2.2 กระบวนการผลิต Stretch Blow Molding	42
2.3 กระบวนการฉีด (Injection Molding)	43
2.4 กระบวนการหมุน (Rotational Molding)	45
2.5 กระบวนการอัด (Compressed Molding)	46
2.6 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion)	46
3.1 การดำเนินงานวิจัยการศึกษาวัดมุมหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล	79
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับขนาดของวัสดุผสม	104
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแตกหักกับขนาด	105
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นกับขนาดของวัสดุผสม	107
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงตึงมากกับผิวหน้ากับขนาดของวัสดุผสม	108
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับขนาดของวัสดุผสม	110
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการพองตัวด้านความหนาแน่นกับขนาดของวัสดุผสม	111
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดูดซึมน้ำกับขนาดของวัสดุผสม	113

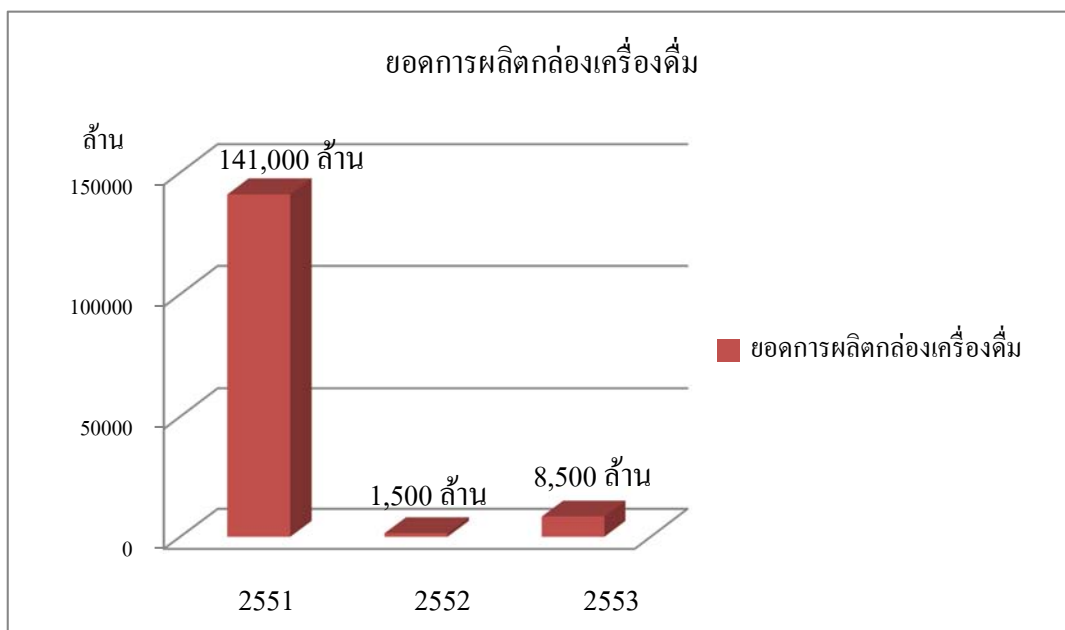
บทที่ 1

บทนำ

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุผงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิลในด้านการทดสอบความแข็ง (Hardness) การทดสอบความหนาแน่น (Density) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (Modulus of Rupture (MOR)) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity (MOE)) การทดสอบการพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling) การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bonding) การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ซึ่งใช้พลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ มาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและสมบัติของวัสดุเพื่อนำมาหาประสิทธิภาพในการใช้งานและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันกล่องนมหรือกล่อง UHT ในประเทศไทยมีการเพิ่มเป็นจำนวนมากที่บรรจุผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย ประกอบกับการบริโภคของบุคคลทุกเพศทุกวัยในประเทศไทยในแต่ละวันมีกล่องนมที่ทิ้งเป็นขยะจำนวนมากเช่นกัน เมื่อกล่องเครื่องดื่มมากขึ้นก็มีผลิตภัณฑ์รีไซเคิลหลายอย่างที่ผลิตจากกล่อง UHT มีผลิตภัณฑ์อีกอย่างที่เกิดขึ้นคือหลังคาจากวัสดุรีไซเคิลที่ได้จากการแยกเยื่อกระดาษออกจากพลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นจึงได้นำอลูมิเนียมฟอยล์และพลาสติกมาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด 180°C เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาซึ่งสมบัติของวัสดุทั้งสองชนิดนี้ มีคุณสมบัติทนไฟ มีความยืดหยุ่น ไม่ดูดความชื้นและไม่ดูดซึมน้ำ



แผนภูมิที่ 1.1 ปริมาณการผลิตกล่องเครื่อง UHT ของบริษัทเต็ดตรา แพ้ค

ผู้จัดทำโครงการจึงได้มีแนวคิดที่จํานํากล่อง UHT ที่เหลือจากการบริโภคเป็นจํานวนมากทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและทางด้านกายภาพ ที่เปลี่ยนแปลงไปของคอมโพสิต ว่ามีการใช้งานได้มีประสิทธิภาพอย่างไร การใช้ลูมินีเยมฟอยล์และพลาสติกสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้และยังช่วยลดปริมาณขยะที่มีเป็นจํานวนมากให้ลดลงได้ ซึ่งหลังจากทดลองนั้น ประหยัดว่าการมุงด้วยหลังคากระเบื้องมาก นอกจากข้อดีที่ราคาถูกแล้ว ยังมีสมบัติที่โดดเด่น ซึ่งอาจจะเหนือกว่าหลังคาราคาแพงๆหลายประเภทดังนี้

1. แผ่นหลังคาจากวัสดุรีไซเคิลมีสมบัติที่โดดเด่น น้ำหนักเบาและทนทานกว่ากระเบื้องหลังคาทั่วไป
2. ผลิตจากกล่องเครื่องดื่มที่บริโภคแล้วโดยไม่ต้องมีการใช้สารเคมีประกอบในกระบวนการผลิต ไม่แตกง่าย ทนไฟ มีความแข็งแรง
3. เนื่องจากมีน้ำหนักเบา จึงไม่ต้องใช้โครงสร้างรองรับหลังคาที่หนักและราคาแพง
4. แผ่นหลังคาไม่ซึมซับและไม่ดูดซับน้ำ ไม่ดูดซับแสงแดด หรือความร้อน ช่วยประหยัดพลังงาน ปลอดภัยจากเชื้อรา
5. ซ่อมแซมง่าย (ด้วยการใช้ความร้อนเชื่อมประสาน)

ดังนั้นทางกลุ่มผู้จัดทำโครงการได้ จึงได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุของหลังคาที่ทำจากวัสดุรีไซเคิลเพื่อที่จะได้รู้ถึงสมบัติของวัสดุนี้

1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เป็นที่ทราบกันว่าปูนซีเมนต์เป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญในการทำกระเบื้องมุงหลังคา ดังนั้นการนำเศษกล่องเครื่องดื่มกลับมาทำเป็นวัสดุมุงหลังคาเป็นการใช้วัสดุซ้ำจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นทรัพยากรจากธรรมชาติ

1.2.2 ช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม โดยการลดปริมาณขยะที่ทิ้งบนพื้น โลกและนำขยะนั้นกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สำหรับกรณีกล่องนมและกล่องเครื่องดื่มประเภทต่างๆและช่วยลดหมอกควันในบรรยากาศเนื่องจากการเผาทำลาย

1.2.3 เป็นการเสริมสร้างประสบการณ์ และสั่งสมความรู้ด้านเทคโนโลยีเฉพาะทางให้แก่บุคลากรผู้ปฏิบัติงาน เช่น วิธีการขึ้นรูป วิธีการทดสอบ และกระบวนการเวียนทำใหม่ของวัสดุรีไซเคิลแต่ละชนิด

1.2.4 สามารถเพิ่มมูลค่า ถ้าเป็นวัสดุมุงหลังคาสามารถขายได้ในราคาแผ่นละ 300-400 บาท ซึ่งในการทำวัสดุมุงหลังคา 1 แผ่น จะใช้กล่องนมประมาณ 2,000 กล่อง

1.2.5 สามารถนำมาทำเป็น อุตสาหกรรม SMEs

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 วัสดุที่ใช้เป็นเพียงกล่องเครื่องดื่ม UHT เท่านั้น

1.3.2 ในการอัดขึ้นรูปร้อนจะใช้อุณหภูมิ 180°C

1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุรีไซเคิลที่นำมาผลิตซึ่งประกอบด้วย

1.3.3.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

1.3.3.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก Modulus of Rupture (MOR)

1.3.3.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น Modulus of Elasticity (MOE)

1.3.3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bonding)

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุรีไซเคิลที่นำมาผลิตซึ่งประกอบด้วย

1.3.4.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

1.3.4.2 การทดสอบการพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling)

1.3.4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

1.3.5 ทำแผ่นมุงหลังคาแผ่นลอนขนาดกว้าง 90 cm. ยาว 240 cm.

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 วางแผนการทำงาน

1.4.2 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

- 1.4.3 ดำเนินการทำชิ้นงานทดสอบ
- 1.4.4 ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน
- 1.4.5 ประเมินผลการทดสอบ
- 1.4.6 สรุปผลการดำเนินงาน
- 1.4.7 สร้างผลิตภัณฑ์
- 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
 - 1.5.1 นำข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุมาใช้ในการเลือกใช้วัสดุเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์
 - 1.5.2 ลดจำนวนขยะประเภทกล่อง UHT ลง เป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อม
 - 1.5.3 ลดการใช้วัตถุดิบใหม่ๆ ทำให้ช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิต
 - 1.5.4 สามารถคิดค้นวัสดุใหม่ๆ มาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ในงานวิศวกรรม

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บทที่ 2

แนวความคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติของแผ่นมุงหลังคา จากวัสดุรีไซเคิลในด้านการทดสอบความแข็ง (Hardness) การทดสอบความหนาแน่น (Density) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (Modulus of Rupture, MOR) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, MOE) การทดสอบการพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling) การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bonding) การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ซึ่งใช้พลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ มาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ดังนั้นคณะผู้จัดทำวิจัย จึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำมาหาประสิทธิภาพในการใช้งานและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์

2.1 นิยามศัพท์สำคัญ

2.1.1 การรีไซเคิล (Recycle) เป็นการจัดการวัสดุเหลือใช้ที่กำลังจะเป็นขยะ โดยนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ โดยเฉพาะการหลอม เพื่อให้เป็นวัสดุใหม่แล้วนำกลับมาใช้ได้อีก ซึ่งวัสดุที่ผ่านการแปรสภาพนั้นอาจจะเป็นผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้ รีไซเคิลมีความหมายต่างจาก รีユส (Reuse) ซึ่งหมายถึง การนำกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรสภาพทั้งสิ้น

2.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

<http://coursewares.mju.ac.th>[1] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.910 ถึง 0.925 g/cm³ โมเลกุลของ LDPE มีแบ็กโบนคาร์บอนที่มีโซ่กิ่งรูปของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับแบ็กโบนหลักอย่างสุ่มๆ LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมี

2.1.3 คอมโพสิต (Composite) จาก <http://www.physics.kku.ac.th>[2] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า

วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่ง

ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced Phase) ยกตัวอย่างคอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fibre) หรือกระดูก ซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2.1.4 UHT (Ultra High Temperature) จาก <http://guru.google.co.th>[3] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าเป็นกระบวนการถนอมอาหารในระบบหนึ่งส่วนมากใช้ผลิตน้ำนมพร้อมดื่มโดยให้น้ำนมที่ผ่านการผสมตามสูตรต่าง ๆ ที่ต้องการผลิตนั้นผ่านระบบความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ ไม่ต่ำกว่า 137-147°C เป็นเวลา 3 วินาทีแล้วทำให้เย็นลงโดยทันที(Drop Down)ให้เหลืออุณหภูมิปกติ(อุณหภูมิห้อง) คือประมาณ 25-30°C แล้วทำการบรรจุในระบบปลอดเชื้อการถนอมอาหารประเภทนี้จะเก็บรักษาคุณภาพอาหารไว้ได้นาน

2.2 แนวคิด

เนื่องจากในปัจจุบันกล่องนมหรือกล่อง UHT ในประเทศไทยมีการเพิ่มเป็นจำนวนมากที่บรรจุผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย จากการศึกษายอดการผลิตกล่อง UHT ของบริษัท อิชิตัน กรุ๊ป จาก <http://www.set.or.th>[4] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ยอดผลิตกล่อง UHT จำนวน 200 ล้านกล่องต่อปี ประกอบกับการบริโภคของบุคคลทุกเพศทุกวัยในประเทศไทย ในแต่ละวันมีกล่องนมที่ทิ้งเป็นขยะจำนวนมากเช่นกัน เมื่อกล่องเครื่องดื่มมากขึ้นก็มีผลิตภัณฑ์รีไซเคิลหลายอย่างที่ผลิตจากกล่อง UHT มีผลิตภัณฑ์อีกอย่างที่เกิดขึ้นคือ หลังจากจากวัสดุรีไซเคิลที่ได้จากการแยกเยื่อกระดาษออกจากพลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นจึงได้นำอลูมิเนียมฟอยล์และพลาสติกมาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนอุณหภูมิที่ 180°C เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมทั้งสองชนิดนี้ มีสมบัติทนไฟ มีความยืดหยุ่น ไม่ดูดความชื้นและไม่ดูดไขมันน้ำ

ข้อมูลที่ทางกรมวิทยาศาสตร์บริการมีข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตกล่อง UHT

<http://science.srru.ac.th>[5] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ผู้ผลิตกล่องปลอดเชื้อรายใหญ่ของประเทศ รายงานว่าในปี 2543 มีการผลิต 2,000 ล้านกล่อง และในปี 2545 ยอดพุ่งสูงขึ้นเป็น 3,000 ล้านกล่อง และเมื่อคำนวณเป็นน้ำหนักของที่ต้องกำจัดทิ้งจะมีปริมาณมากถึง 30,000 ตัน/ปี ซึ่งเป็นจำนวนขยะที่ไม่ใช่น้อย ด้วยเหตุนี้ จึงได้จัดทำโครงการศึกษาวิจัยเพื่อกำจัดพร้อมสร้างมูลค่าขยะกล่องนม โดยนำเศษขยะกล่องนมเหล่านี้มาผ่านกระบวนการรีไซเคิล เพื่อนำมาผลิตเป็นเยื่อเวียนทำใหม่ (Recycled Pulp) สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษชนิดอื่นต่อไป บรรดานมกล่อง

ทั้งหลายที่เมื่อกินเสร็จ ก็ต้องก็จะกลายเป็นขยะ แต่วันนี้มีวิธีแปลงขยะให้เป็นเงินแล้ว สำหรับวัสดุที่นำมาทำกล่องปลอดเชื้อจะต้องได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ลักษณะโครงสร้างของกล่องผลิตเยื่อเวียนทำใหม่ฟอกขาวจากเศษกระดาษกล่องนมแล้ว ตกประมาณ 5,000 บาท/ตัน (ไม่รวมค่าวัตถุดิบ) แต่ราคาซื้อขายของเยื่อเวียนทำใหม่ อยู่ในประมาณ ตันละ 25,000 บาท สถานที่แยกขยะกระดาษ ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าว คือ 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

พอลิเอทิลีนกับการขึ้นรูปใหม่จิราภรณ์คำศรี [6] ได้กล่าวไว้ว่างานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง โดยได้ศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมซึ่งพบว่าการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวตามด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้งทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียวและจากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเนื่องจากการยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำซึ่งงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิดได้แก่คลอรีนเตดพอลิเอทิลีน (CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Elvaloy) จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (PA 20) ให้สมบัติโดยรวมที่เหมาะสมในการนำไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิตสำหรับการทดสอบโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์คาร์บอน 13 พบว่า PVC ไม่เกิดการตอกรัดกับ LDPE และที่อัตราส่วน PVC100DPE10 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอนุมูลอิสระของ PVC และ LDPE ระหว่างกระบวนการผสมแต่เมื่อใส่สารช่วยผสมชนิด PA 20 และผงไม้ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC มีค่าต่ำลงในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อใช้สารช่วยผสมการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ดีขึ้นและอนุภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลงนอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนคล้ายแก้วการถ่านไอออนอุณหภูมิของวัสดุคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature :Tg) ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE และ II Elvaloy มีค่าลดลงโดยที่ Tg ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 มี Tg ใกล้เคียงกับ PVC บริสุทธิ์มากกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy สำหรับสมบัติต่างๆของคอมพอลิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและนี้เนื่องจากไม่ยางพาราพบว่าเมื่อปริมาณขี้เลื่อยมากขึ้นมอดูลัสการดึงยืดและมอดูลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์การดึงยืดขนาดความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงโดยที่สมบัติต่างๆมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20

แนวคิดในการทำโครงการครั้งนี้ เพื่อที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุหลังจากวัสดุรีไซเคิล ซึ่งในการศึกษาสมบัติของวัสดุในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็ง การทดสอบหาค่าความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า การพองตัวด้านความหนา การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก ผู้จัดทำโครงการจึงได้ศึกษาค้นคว้า และได้จัดทำผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคาแบบลอนขึ้นมามีจำนวน 10 แผ่น มีขนาดกว้าง 90 cm. ยาว 240cm.

2.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมพอลิตของเส้นใยสับประรดกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตด

รังสิมา ชลคุปรัตน์า ดันตเทอดธรรม และ สุชาดา อุชชิน[7]ได้กล่าวไว้ว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เส้นใยสับประรด (Pineapple Leaf Fiber, PALF) เสริมแรงให้กับคอมพอลิตเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เปรียบเทียบกับคอมพอลิตพอลิเอทิลีนชนิด Low Density Polyethylene (LDPE) โดยทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใย (0-20%) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอลิตทั้งสอง ผลที่ได้พบว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านแรงดึงของคอมพอลิตทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่คอมพอลิต EVA ให้ผลของการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ คอมพอลิต LDPE โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใยมากกว่า 15% จากลักษณะพื้นฐานสามารถเห็นการกระจายตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ของคอมพอลิตทั้งสองไม่แตกต่างกัน แต่เห็นการขาดของเมตริกซ์ EVA แบบเปราะ (Brittle) ขณะที่เมตริกซ์ของ LDPE จะเห็นผิวหน้ามีการยืดตัวแบบเหนียว (Ductile) ลักษณะกราฟของความเค้นและความเครียดของคอมพอลิต EVA มีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น ขณะที่คอมพอลิต LDPE ที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ ให้ลักษณะกราฟที่มีจุดคราก

(Yield Point) ส่วนค่า Stress Efficiency Factor ของเส้นใยในคอมโพสิต EVA มีค่ามากกว่าในคอมโพสิต LDPE เนื่องจากผลของโครงสร้างพอลิเมอร์ EVA ที่มีหมู่ที่ขบับนํามากกว่า

2.3.3 การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของฟิลเลอร์ต่อสมบัติต่างๆของพลาสติกผสม

2.3.3.1 การเตรียมปฏิกิริยาจันเพชร และนกรศ กองทอง[8] ได้สรุปไว้ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมผงแคลบโดยการผสมพอลิเมอร์และผงแคลบด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งแล้วขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปเพื่อทำการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ความแข็งแรงความต้านทานแรงกระแทกความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อแรงคัดงอ โดยในการศึกษานี้ได้ใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 2 เกรดคือเกรดบริสุทธิ์และเกรดรีไซเคิลจากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงค่ามอดูลัสของยังส์และค่ามอดูลัสของการคัดงอเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงแคลบที่เพิ่มขึ้นขณะที่ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเติมผงแคลบในปริมาณมากขึ้นซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งในเนื้อพื้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกรดบริสุทธิ์และเกรดรีไซเคิลและเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เนื้อพื้นทั้ง 2 เกรดพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เนื้อพื้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกรดรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเนื้อพื้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกรดบริสุทธิ์

2.3.3.2 ปริญญานิพนธ์สุภัทราบุตรทองคำ และมูกระวีพรหมศรีชา [9] ได้สรุปไว้ว่า ได้ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกคอมโพสิตที่ได้จากการผสมระหว่างพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene ; LDPE) และเถ้าลอย (Fly Ash) เพื่อผลิตพลาสติกคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ยอดเยี่ยมเหนือพลาสติกบริสุทธิ์ซึ่งสามารถนำไปใช้งานเชิงวิศวกรรมได้และเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัสดุคอมโพสิต โดยทำการศึกษาปริมาณของเถ้าลอยที่เหมาะสมตั้งแต่ 30 ถึง 50 ส่วนในพลาสติก LDPE ร้อยส่วน โดยเริ่มทำการเตรียมพลาสติกคอมโพสิตบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งจากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนและขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์มแล้วจึงนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานได้แก่ความต้านทานแรงกระแทก (ASTM D256) ความแข็ง (Shore D : ASTM D2240) ความต้านทานต่อแรงคัดโค้ง (ASTM D790) และความต้านทานต่อแรงดึง (ASTM D638) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิตที่มีอนุภาคเถ้าลอยในปริมาณต่างกันเป็นตัวเสริมแรงจากการทดสอบพบว่าเมื่อผสมอนุภาคเถ้าลอยลงในพลาสติก LDPE มากขึ้นจะทำให้พลาสติกคอมโพสิตที่ได้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงคัดโค้งมอดูลัสคัดโค้งและความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ค่าความต้านทานแรงกระแทก

ค่ามอดูลัสยังส์และมอดูลัสการคดโค้งเมื่อเดิมในปริมาณมากขึ้นและจะค่อยๆลดลงเมื่อเดิมในปริมาณมากขึ้นความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อผสมเกล็ดลอยในปริมาณเพิ่มมากขึ้นและจะค่าลดลงตามลำดับเมื่อมีปริมาณเกล็ดลอยมากกว่า 35 ส่วนใน LDPE ร้อยส่วน ดังนั้นจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเกล็ดลอยสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงให้แก่พลาสติกคอมพอสิตได้รวมทั้งสามารถเติมเกล็ดลอยได้มากถึง 50 ส่วนใน LDPE ร้อยส่วนเพื่อลดต้นทุนในการผลิตโดยยังรักษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกคอมพอสิตได้

2.4 การรีไซเคิล (Recycle) จาก <http://yongrecycle.blogspot.com> [10] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าการจัดการวัสดุเหลือใช้ที่กำลังจะเป็นขยะ โดยนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ โดยเฉพาะการหลอมเพื่อให้เป็นวัสดุใหม่แล้วนำกลับมาใช้ได้อีก ซึ่งวัสดุที่ผ่านการแปรสภาพนั้นอาจจะเป็นผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้ รีไซเคิลมีความหมายต่างจาก รีユส (Reuse) ซึ่งหมายถึง การนำกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรสภาพใดๆทั้งสิ้นในความเข้าใจของคนบางกลุ่มนั้น การรีไซเคิลยังหมายถึง การนำวัสดุเหลือใช้กลับมาปรับเปลี่ยนรูปแบบ หรือพัฒนารูปร่างใหม่ ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ เช่น ขวดน้ำพลาสติกหากนำมาใช้ใส่น้ำอีกครั้งเป็น การรีユส(Reuse) แต่ถ้านำเอาขวดน้ำพลาสติกมาตัดให้เป็นกระป๋อง แล้วนำไปใช้ตัดดินบรรจุในถุง หรือนำขวดพลาสติกมาตัดครึ่ง เป็นแจกันใส่ดอกไม้ หรือเป็นที่ใส่ปากกา มักถูกเรียกว่าเป็นการรีไซเคิลขวดน้ำพลาสติก

2.4.1 การรีไซเคิลกล่องเครื่องดื่ม <http://www.tcdc.or.th> [11] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าการรีไซเคิลกล่องนมเพื่อเราเพื่อธรรมชาติเพื่อ โลกปัจจุบันกล่องเครื่องดื่ม เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เพราะกล่องปลอดเชื้อที่คงคุณค่าและเก็บความสดใหม่ให้กับเครื่องดื่มได้นานถึง 6 เดือนโดยไม่ต้องใส่วัตถุกันเสีย และไม่ต้องแช่เย็น จึงปลอดภัยสำหรับผู้บริโภคทุกวัย เมื่อไม่ต้องแช่เย็นก็ไม่ต้องเปลืองค่าไฟ น้ำหนัก กล่องเบาช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในการขนส่งกระจายซึ่งเป็นวัสดุหลักในการผลิตกล่องมาจากสวนป่าที่ปลูกทดแทนต่อเนื่องพร้อมหมุนเวียนมาใช้ใหม่เพื่อทดแทน (Renewable) จึงไม่ต้องทำลายป่าไม้จากธรรมชาติ จะเห็นได้ว่าเจ้ากล่องเครื่องดื่มนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่รักษาสีสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่กระบวนการผลิต จนถึงการนำไปรีไซเคิล ซึ่งไม่มีส่วนใดเหลือทิ้งเป็นขยะเลยทีเดียว

กล่องเครื่องดื่มที่เหล่านี้นสามารถนำมาสร้างผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายอย่าง กระดาษเครื่องดื่มผลิตมาจากเยื่อกระดาษที่มีเยื่อใยยาวและเยื่อถึงเคมีที่ไม่เคยใช้งาน มาก่อน เยื่อกระดาษจึงมีความแข็งแรงกว่าเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษเก่า (Old Corrugated Carton Boxes) ที่ผ่านการรีไซเคิลมาหลายครั้ง ดังนั้น เยื่อกระดาษที่ได้มาจากกล่องเครื่องดื่ม จึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็น

กระดาศกล่องที่ต้องการความแข็งแรงสูง ส่วนพลาสติกและฟอยล์สามารถนำไปทำเป็นอุปกรณ์พลาสติกที่ต้องการความแข็งแรง เช่น ค้ำจับกระทะ หรือผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลทั่วไป กล่องเครื่องดื่มที่ใช้แล้ว จะถูกนำมาตัดย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนที่จะนำมาโรยบนแผ่นเหล็กเพื่อขึ้นรูป แผ่นตามความหนาที่ต้องการ จากนั้นจะนำเข้าสู่เครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เพื่อหลอมพลาสติกที่ปนอยู่แล้วจึงนำไปเข้าสู่เครื่องอัดเย็น โดยพลาสติกจะเป็นตัวยึดกระดาศและอลูมิเนียม ฟอยล์ให้ติดเป็นเนื้อเดียวกันจึงไม่จำเป็นต้องใช้กาวหรือสารเคมีใดๆ เลยในขั้นตอนการผลิต

2.5 กล่องเครื่องดื่มจาก<http://www.ampolfood.com>[12]มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่ากล่องน้ำดื่ม หมายถึง กล่องที่ใช้บรรจุเครื่องดื่ม หรืออาหารเหลวประเภทนม น้ำผลไม้ ชา กาแฟ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.5.1 กล่องยูเอชที มีกระดาศ อลูมิเนียมฟอยล์ และพลาสติก ประเภทโพลีเอททิลีนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ สามารถเก็บไว้ได้นาน โดยไม่ต้องแช่เย็น

2.5.2. กล่องพาสเจอไรซ์ มีส่วนประกอบเป็นกระดาศ และพลาสติก เท่านั้น จึงต้องแช่เย็น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่เก็บไว้ได้นาน

กล่องที่ใช้บรรจุนม UHT เราเรียกว่า “ เต็ดตราแพ็ค ” นั้นประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิด คือ กระดาศ 75 % โพลีเอททิลีน 20% และอลูมิเนียมฟอยล์ 5 % ประกบเข้าด้วยกัน ถึง 6 ชั้น แต่ละชั้นมีหน้าที่ ดังนี้

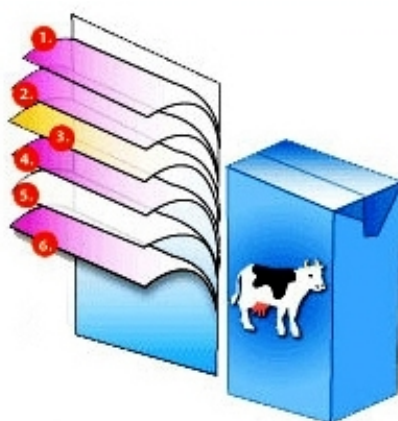
- ชั้นที่ 1 พอลิเอททิลีนเป็นฟิล์มบางเคลือบด้านนอกเพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอก
- ชั้นที่ 2 กระดาศเพื่อรักษารูปทรงของกล่องให้กล่องคงทนแข็งแรง การพิมพ์ฉลากก็จะพิมพ์ที่ชั้นนี้
- ชั้นที่ 3 พอลิเอททิลีนเป็นตัวเชื่อมระหว่างชั้นกระดาศกับอลูมิเนียมฟอยล์ ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท
- ชั้นที่ 4 อลูมิเนียมฟอยล์ป้องกันอากาศ (ออกซิเจน) แสงสว่าง และกลิ่นจากภายนอก
- ชั้นที่ 5 พอลิเอททิลีนเป็นตัวเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกชั้นในสุด ช่วยผนึกกล่องให้แน่นสนิท

ชั้นที่ 6 พอลิเอททิลีนป้องกันการรั่วซึมของนมที่อยู่ในกล่อง

นอกจากนั้น การบรรจุและปิดผนึกกล่องนม UHT ต้องบรรจุในห้องที่ปลอดเชื้อ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้นม UHT สามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเดือน โดยไม่ต้องแช่เย็นนั่นเอง



ภาพที่ 2.1 กล่อง UHT



ภาพที่ 2.2 ชั้นของกล่อง UHT

ชั้นของกล่อง UHT

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

2.6 วัสดุผสม (Composite)

เอกวิเสรี, เดชานาคจันทร์ และเรืองชัยรัชชาติ[13] ได้สรุปว่าเนื่องจากปริมาณความต้องการในการพัฒนาวัสดุผสมเพิ่มสูงขึ้นเพื่อใช้ในการงานวิศวกรรม ทำให้มีการนำพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุต่างๆ เพิ่มมากขึ้น โดยวัสดุผสม (Composite) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้น

รวมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced Phase) ยกตัวอย่างวัสดุผสมที่พบในธรรมชาติเช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุทางประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) หรือกระดูก ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีน และคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น โดยในส่วนของวัสดุผสมสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทางโดยสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นอัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ โดยวัสดุผสมสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite) วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite) และวัสดุโครงสร้าง (Structural Composite)

2.6.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite) คือวัสดุผสมที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่ยึดเสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น

2.6.1.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite) คือ วัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะและในรูปของมอดุลัสจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ โดยวัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบดังนี้

2.6.1.2 วิสเกอร์ (Whisker) คือผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก

2.6.1.3 ไฟเบอร์ (Fiber) คือเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก เช่น เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

2.6.1.4 ลวดเล็ก (Fine Wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ และไฟเบอร์และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ตัวอย่างการใช้งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (Rocket Casing) เป็นต้น

2.6.1.5 วัสดุผสมโครงสร้าง (Structural Composite) วัสดุผสมโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและวัสดุผสมสมบัติของวัสดุผสมโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย เราสามารถแบ่งวัสดุผสมโครงสร้างได้เป็นสองประเภทคือ วัสดุผสมแบบชั้น (Laminar Composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel)

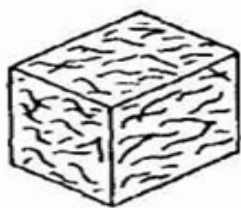
2.6.1.6 วัสดุผสมแบบชั้น (Laminar Composite) ประกอบด้วยแผ่นชีท (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวมาเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่น แผ่นวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัวขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นวัสดุผสมแบบชั้น เพื่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นชีทแบบสลับทิศทางของเส้นใย ตัวอย่างวัสดุผสมประเภทนี้ เช่น กระดานสกี เป็นต้น

2.6.1.7 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel) เป็นวัสดุผสมโครงสร้างประเภทหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแกนกลาง และประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นชีทที่เป็นผิวนอกโดยมีแผ่นกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่นแกนกลางและแผ่นประกบติดกัน โดยหน้าที่ของแผ่นประกบ คือเป็นตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ยกตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำเป็นประกบ เช่น อะลูมิเนียมอัลลอย เหล็กกล้า ไทเทเนียม ไม้อัด หรือแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นต้น ส่วนแกนกลางจะช่วยเพิ่มค่า (Shear Rigidity) ในระนาบตั้งฉากกับแผ่นประกบ และมักจะเป็นโครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน รูปแบบโครงสร้างของแผ่นแกนกลางที่นิยมใช้คือแบบรังผึ้ง (Honey Structure) โดยวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นแกนกลาง ได้แก่ พอลิเมอร์โฟม ขางสังเคราะห์ หรือโลหะ-อัลลอย เป็นต้น โดยวัสดุคอมโพสิตมีลักษณะเด่น คือ วัสดุคอมโพสิตยังประกอบด้วยตัวเสริมแรง (Reinforce Phase) และเนื้อประสาน (Matrix) เช่น พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่ในการประสาน เชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างตัวเสริมแรงเพื่อทำให้เกิดโครงข่าย 3 มิติ (Crosslinking) เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่วัสดุคอมโพสิต ทั้งนี้ด้วยสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้างและโครงสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น กลุ่มของวัสดุคอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น

3 กลุ่มได้แก่

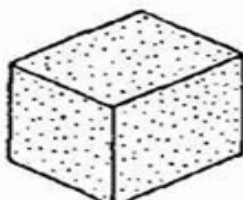
1. กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-Reinforced Polymers, FRP)
2. กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-Matrix Composite, CMC)
3. กลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-Matrix Composite, MMC)

นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตอาจจะแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง ได้แก่



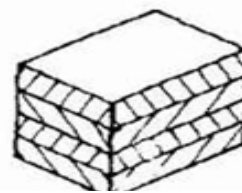
a. ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย

(Fiber Composite)



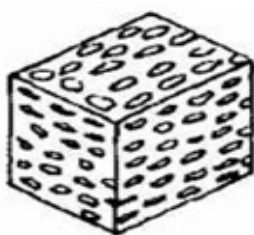
b. อนุภาคของวัสดุผสม

(Particle Composite)



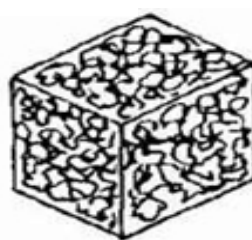
c. ชั้นของวัสดุผสม

(Laminar Composite)



d. ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ

(Flake Composite)

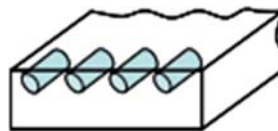
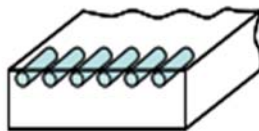
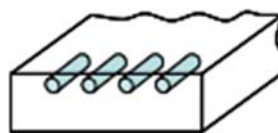
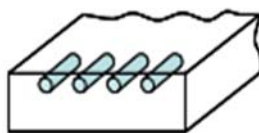


e. ตัวเสริมแรงเป็นสารตัวเติม

(Filled Composite)

ภาพที่ 2.3 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

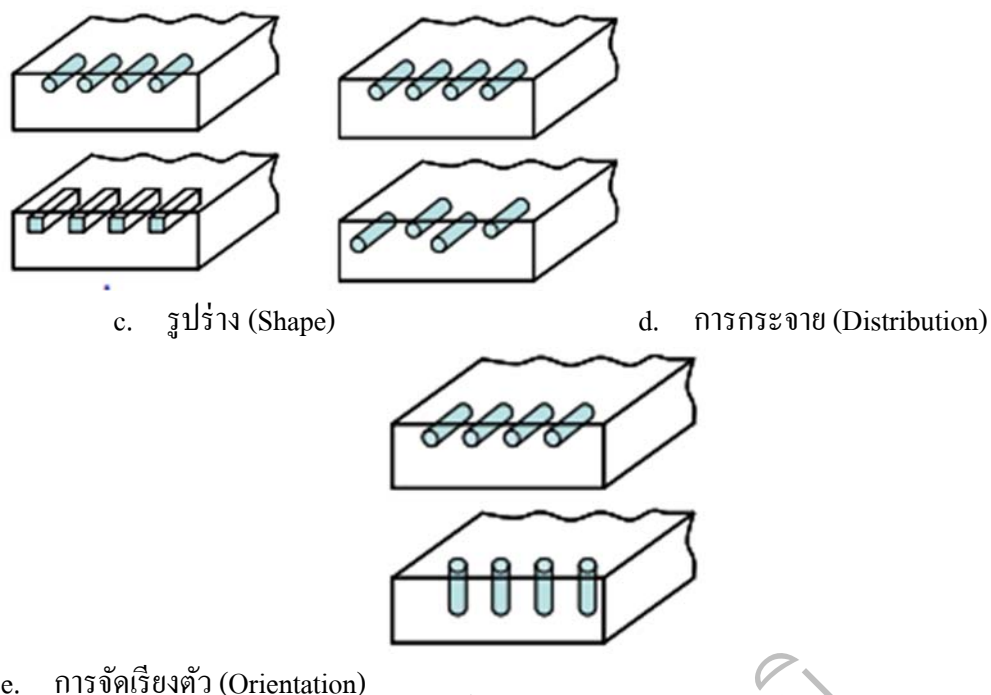
ในส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ รูปที่ แสดงถึงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว สุดท้ายคอมโพสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน



a. ความเข้มข้น (ปริมาณ)(Concentration)

b. ขนาด (Size)

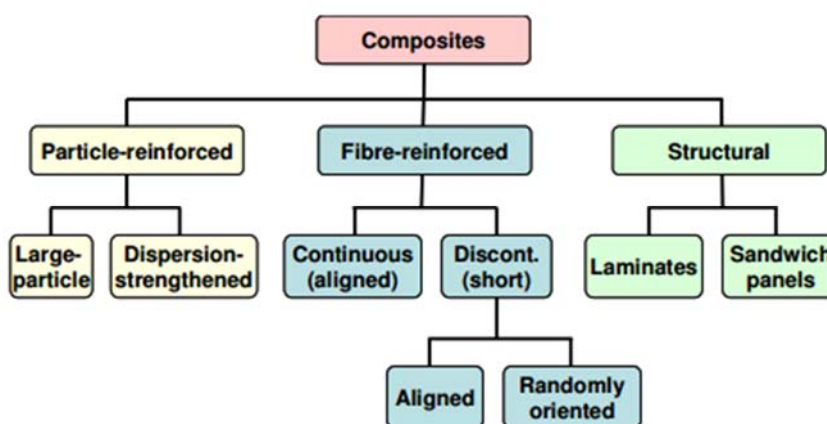
ภาพที่ 2.4 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว



e. การจัดเรียงตัว (Orientation)

ภาพที่ 2.4 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว(ต่อ)

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-Reinforced Composite) และคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) นอกจากนี้แล้ว คอมโพสิตแต่ละประเภทยังสามารถเป็นประเภทย่อยๆได้อีก ดังแสดงในแผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิต



ภาพที่ 2.5 ประเภทของคอมโพสิต

2.6.1 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือคอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-Particle Composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-Strengthened Composite)

2.6.1.1 คอมโพสิตเสริมด้วยแรงอนุภาคขนาดใหญ่ คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้คือเรามาองภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุกๆทิศทาง นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วยคำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้คือเรามาองภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุกๆทิศทาง นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วย $(E_c(U))$ กับค่าขอบเขตต่ำสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น $(E_c(I))$ ของคอมโพสิต ค่า $(E_c(U))$ และค่า $(E_c(I))$ สามารถหาได้จากสมการ

$$(E_c(U)) = E_m V_m + E_p V_p \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$(E_c(I)) = \frac{E_m V_m}{V_n E_p + V_p E_m} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ E คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และ V คือสัดส่วนโดยปริมาตร และสัญลักษณ์ตัวห้อย c, m และ p แทนคอมโพสิต เมทริกซ์ และอนุภาค ตามลำดับตัวอย่างของคอมโพสิตประเภทนี้ที่รู้จักกันดีคือคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยเมทริกซ์ของซีเมนต์ โดยมีทรายและกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่เพื่อช่วยในการเสริมแรง และนอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้ว การที่ใส่ทรายกับกรวดลงไปผสมทำให้สามารถลดปริมาณของซีเมนต์ซึ่งมีราคาแพงกว่า จึงเป็นการลดต้นทุนอีกทางหนึ่งด้วย

2.6.1.2 คอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค ในคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้ อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าคอมโพสิตที่มีอนุภาคนาโนใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 - 100nm. อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Particle-Matrix Interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ตัวอย่างของคอมโพสิตประเภทนี้ เช่น นิกเกิล ทีดี (TD Nickel) คือ นิกเกิลอัลลอยที่เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยการเติมอนุภาคของทอเรีย (Thoria, ThO_2) ประมาณ 3% โดยปริมาตรลงไปกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของนิกเกิล อีกตัวอย่างหนึ่งคือยางรถยนต์ ซึ่งได้จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 - 50nm. ปริมาณ 15 - 30 % โดยปริมาตรลงไปในยางวัลคาไนซ์ (Vulcanised Rubber) เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกหรอให้กับยาง

2.6.2 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดูลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

2.6.2.1 ส่วนประกอบของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบดังนี้

1) วิสเกอร์ (Whisker) คือผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา เป็นต้น

2) ไฟเบอร์ (Fibre) คือเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึกหรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น อะรามิด (Aramid) แก้ว คาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

3) ลวดเล็ก (Fine Wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์และไฟเบอร์และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (Rocket Casing) เป็นต้น

4) เมทริกซ์(Matrix)เมทริกซ์อาจเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิกหรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์คือยึดไฟเบอร์ไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังไฟเบอร์ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของไฟเบอร์ เนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (Adhesive Bonding Force) ระหว่างไฟเบอร์กับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่ไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์

2.6.3 อิทธิพลของความยาวเส้นใยที่มีต่อสมบัติของคอมโพสิต ความยาวของเส้นใยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงความแข็งแรงดึงของคอมโพสิต และเพื่อให้คอมโพสิตมีสมบัติดังกล่าวที่ดี เส้นใยที่นำมาเสริมแรงควรมีค่าความยาววิกฤติค่าหนึ่ง ค่าความยาววิกฤตินั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (Shear Yield Strength) ของเมทริกซ์ แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาววิกฤติของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย แสดงดังสมการ

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \dots\dots\dots(2.3)$$

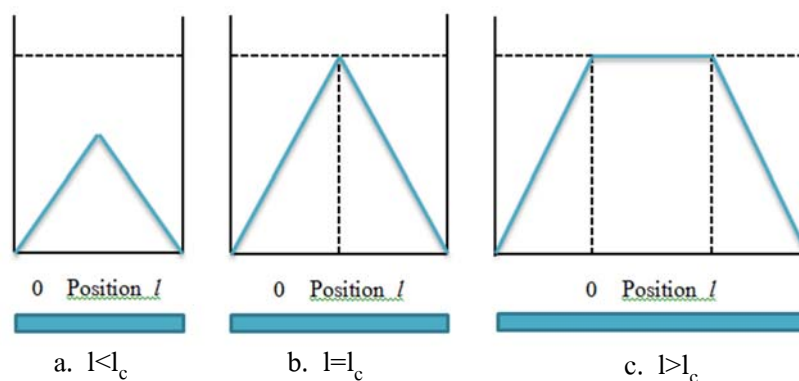
เมื่อ l_c คือความยาววิกฤติ

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

σ_f คือความแข็งแรงสูงสุด หรือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย

τ_c คือความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดครากของเมทริกซ์ แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน

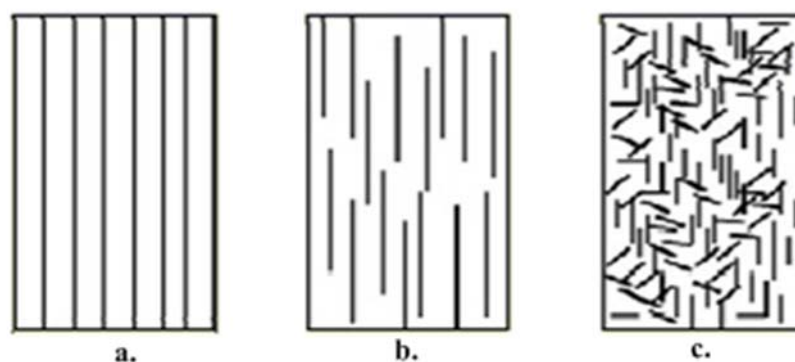
โดยทั่วไปแล้ว สำหรับคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับคาร์บอนเมทริกซ์ เส้นใยจะมีค่าความยาววิกฤติ ประมาณ 1mm. ซึ่งคิดเป็น 20-150 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_f และความยาวของเส้นใย(l)เมื่อ (a) $l < l_c$ (b) $l = l_c$ (c) $l > l_c$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_u และความยาวของเส้นใย แสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อเส้นใยมีความยาวน้อยกว่า l_c (ภาพที่ 2.6 (a)) เส้นใยจะไม่สามารถรับแรงได้มากถึงค่า σ_u แต่เมื่อเส้นใยมีความยาวเท่ากับ l_c (ภาพที่ 2.6(b)) บริเวณกึ่งกลางของความยาวเส้นใยจะสามารถรับแรงได้ถึงค่า σ_u และถ้าเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c (ภาพที่ 2.6(c)) ช่วงของความยาวเส้นใยที่สามารถรับแรงได้ถึงค่า σ_u จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้วยเส้นใยดีขึ้นด้วย

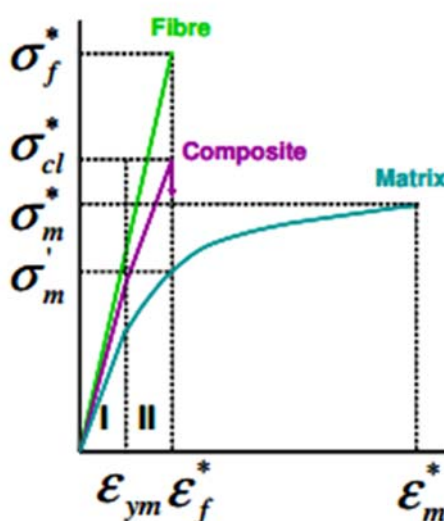
เราสามารถแบ่งประเภทของเส้นใยตามความยาวของมันได้เป็นสองประเภทคือ เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) ในกรณีเส้นใยต่อเนื่อง หมายถึงเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c มากๆ (โดยทั่วไปคือมากกว่า $l_c/5$) ส่วนเส้นใยไม่ต่อเนื่อง หมายถึงเส้นใยมีความยาวน้อยกว่า l_c นอกจากนี้เมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเมทริกซ์ให้เกิดเป็นคอมโพสิต จะสามารถจัดเรียงตัวได้สามแบบด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ (a) เส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (b) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน และ (c) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

ภาพที่ 2.7(a) คือคอมโพสิตประเภทเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยมีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางที่เรียงตัวของเส้นใยที่ดี ส่วนภาพที่ 2.7(b) คือกรณีที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยไม่ยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิต แต่ยังคงเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางที่เรียงตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าในกรณีแรก สุดท้ายภาพที่ 2.7(c) คือเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบกรณีนี้ประสิทธิภาพการเสริมแรงจะต่ำที่สุดจากทั้งสามประเภทที่กล่าวมา ซึ่งวิธีการคำนวณค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยประเภทต่างๆ เหล่านี้จะกล่าวถึงต่อไป

2.6.4 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วว่า คอมโพสิตประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (ดังแสดงในภาพที่ 2.7(a)) คือ คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่ามอดูลัสยืดหยุ่น เมื่อคอมโพสิตประเภทนี้ได้รับแรงในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของเส้นใย อย่างไรก็ตามถ้าคอมโพสิตตัวเดียวกันนี้ได้รับแรงในทิศตั้งฉากกับการเรียงตัวของเส้นใยแล้ว ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (หรือประสิทธิภาพในการเสริมแรง) จะลดลงเป็นอย่างมาก ลักษณะที่สมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมากเช่นนี้ทำให้เราสามารถเรียกคอมโพสิตประเภทนี้ได้ว่า เป็นวัสดุที่มีสภาพแอนไอโซทรอปิก



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เมทริกซ์ และคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย

- เมื่อ σ_m^I ความเค้นของเมทริกซ์เมื่อเส้นใยแตกหัก
 σ_m^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
 σ_{cl}^* ความเค้นสูงสุดของคอมโพสิต
 σ_f^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
 ϵ_{ym} ความเครียด ณ จุดครากของเมทริกซ์
 ϵ_f^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเส้นใยแตกหัก
 ϵ_m^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเมทริกซ์แตกหัก

พฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดึง เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย สำหรับคอมโพสิตประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อได้รับแรงในแนวขนานกับเส้นใยจะมีพฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดึงดังแสดงในภาพที่ 2.8 เริ่มต้นในช่วงของการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นของเมทริกซ์ (อยู่ในช่วงที่ I) เมื่อให้แรงดึง ทั้งเส้นใยและเมทริกซ์จะมีการยืดออก โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นเมื่อความเครียดมีค่ามากกว่า ϵ_{ym} (เข้าสู่ช่วงที่ II) เมทริกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร และเมื่อให้แรงเพิ่มขึ้นจนความเครียดมีค่าเท่ากับ ϵ_f^* จะเกิดการแตกหักของเส้นใย นั่นคือเส้นใยไม่ได้ช่วยในการรับแรงอีกต่อไป ดังนั้นความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงสุดของคอมโพสิตจะมีค่า

2.6.2 คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบเท่ากับ σ_c^* และหลังจากนั้นจะมี เพียงเมทริกซ์ที่ทำหน้าที่รับแรง และคอมโพสิตจะแตกหักเมื่อได้รับแรงดึงที่ทำให้เกิดค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ ϵ_m^* ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เมทริกซ์แตกหัก

พฤติกรรมยืดหยุ่น เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย ในกรณีที่พื้นที่พันธะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีความแข็งแรงมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำเส้นใยและเมทริกซ์จะมีการเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆ กัน หรือที่เรียกว่าสถานะความเครียดเท่ากัน (Isostrain State)

แรงที่คอมโพสิตรองรับ (F_c) จะมีค่าเท่ากับแรงที่เมทริกซ์รองรับ (F_m) รวมกับแรงที่เส้นใยรองรับ (F_f) ดังแสดงในสมการ

$$F_c = F_m + F_f \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานและความเค้นที่ว่า $\sigma = \frac{F}{A}$ หรือ

$F = \sigma A$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ 2.4 ใหม่ได้ว่า

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

เนื่องจากเส้นใยมีความยาวต่อเนื่องตลอดทั้งชิ้นงาน ดังนั้นคอมโพสิต เมทริกซ์และเส้นใยต่างก็มีความยาวเท่ากัน นั่นคือ $\frac{A_m}{A_c} = V_m$ และ $\frac{A_f}{A_c} = V_f$ และเมื่อแทนที่ลงในสมการ จะได้ว่า

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

และเนื่องจากอยู่ในสถานะความเครียดเท่ากัน $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$ จะได้ว่า

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \dots \dots \dots (2.8)$$

ในกรณีที่คอมโพสิตมีการเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่น จะได้ว่า

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \dots \dots \dots (2.9)$$

เมื่อ E_{cl} คือค่ามอดุลัสของคอมโพสิตในแนวนานกับเส้นใยหลังคา พื้น กำแพงของอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้เรายังสามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงที่เส้นใยรองรับกับแรงที่เมทริกซ์รองรับได้จากสมการ

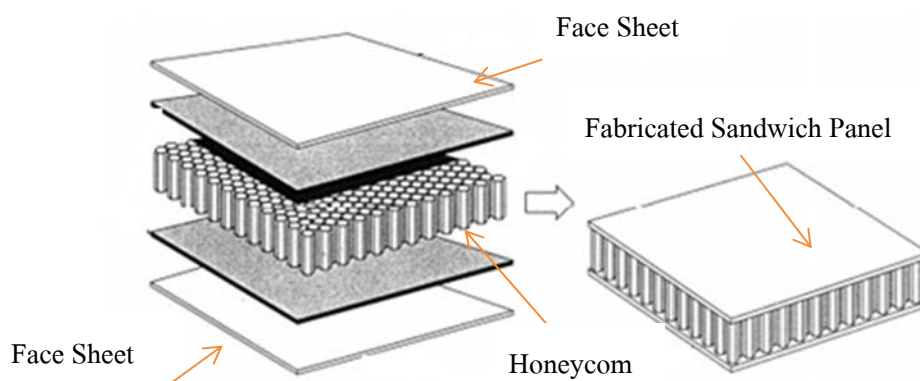
$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \dots \dots \dots (2.10)$$

2.6.5 คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย สามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar Composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel)

2.6.6 คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar Composite) คอมโพสิตแบบชั้นประกอบด้วยแผ่นชีท (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทาง เดียวมาเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่น แผ่นคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัว ขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นคอมโพสิตแบบชั้น เพื่อประสิทธิภาพ ของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นชีทแบบสลับทิศทางของเส้นใย ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิต ประเภทนี้ เช่น กระดานสกี เป็นต้น

2.6.7 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel) ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชเป็นคอมโพสิตโครงสร้างประเภทหนึ่ง ซึ่งมีส่วนประกอบเป็น

- 1 แกนกลางหรือที่เรียกว่า Core
- 2 ผิวนอกหรือที่เรียกว่า Face



ภาพที่ 2.9 คอมโพสิตแบบชั้นอลูมิเนียมฟอล์ย

เป็นคอมโพสิตแบบชั้นอลูมิเนียมฟอล์ยจึงนำไปให้ความร้อน แล้วนำมาแช่แข็ง และให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งได้โดยไม่ต้องถ่ายภาชนะ ไม่ดูความชื้นและของเหลว จึงไม่หดตัว ย่นหรืออ่อนตัว โค้งงอได้จึงพับ จีบ หรือขึ้นรูปได้ อยู่ตัวดี จึงนำมาใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น แกนกลางหรือที่เรียกว่า (Core) จะถูกประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นชีท ที่เป็นแผ่นผิวหน้า (Face) โดยมีกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่นแกนกลาง (Core) และแผ่นผิวหน้า (Face) ติดกัน โดยแต่ละส่วนทำหน้าที่ ดังนี้

แกนกลาง (Core) จะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear Rigidity) ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น Face และมักจะเป็นโครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน วัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนกลาง (Core) ได้แก่ พอลิเมอร์ ยางสังเคราะห์ หรือโลหะและอัลลอยพลาสติกชนิด (PE; Polyethylene) เป็นต้น

แผ่นผิวหน้า (Face) คือ ตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ยกตัวอย่าง วัสดุที่ใช้ทำแผ่นผิวหน้า (Face) เช่น อลูมิเนียมอัลลอย เหล็กกล้า ไทเทเนียม ไม้อัด หรือแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นต้น

เนื่องจากแกนกลาง (Core) เป็นโครงสร้างแบบโปร่ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา ดังนั้นผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชจึงถูกนำไปใช้งานได้ หลากหลาย สามารถทำเป็นหลังคา พื้น กำแพงของอาคาร เป็นต้น

2.6.8 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือคอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรงซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-Particle Composite) และ คอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion Strengthened Composite)

2.6.9 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้คือเรามองภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุกๆทิศทาง นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วยค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตที่เกิดจากสององค์ประกอบ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบทั้งสอง ซึ่งสามารถ คำนวณได้จากสมการ “กฎของการผสม (Rule of Mixture)” โดยที่ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตนั้นๆ จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าขอบเขตสูงสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ($E_c(u)$) กับค่าขอบเขตต่ำสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ($E_c(l)$) ของคอมโพสิต ค่า ($E_c(u)$) และค่า ($E_c(l)$) สามารถหาได้จากสมการ

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

2.7 อลูมิเนียมฟอยล์(Foil)จาก<http://www.linearenergy.com>[14]มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า อลูมิเนียมฟอยล์คือ แผ่นอลูมิเนียมที่นำมารีดจนบาง โดยมีความหนาต่ำกว่า 250 ไมครอนอลูมิเนียมฟอยล์สามารถนำไปใช้ในการยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเด่นดูสวยงามขึ้นด้วย ด้วยสมบัติ ไม่มีกลิ่นและรสไม่เป็นพิษเหมาะสำหรับใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร ยา และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ การที่ทึบแสงจึงใช้เป็นภาชนะบรรจุกันแสงสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมคุณภาพได้ง่าย เมื่อได้รับแสงจะสะท้อนรังสีความร้อน เนื่องจากผิวหน้าทั้ง 2 ด้านต่างกัน คือมันและด้าน จึงสะท้อนรังสีความร้อนได้ 95% ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องรักษาอุณหภูมิให้ต่ำหรือสูง เช่นอาหารแช่แข็งที่บรรจุในภาชนะแผ่นเปลวอะลูมิเนียมจะเกิดการสะท้อนรังสีความร้อนทำให้การละลายเกิดขึ้นช้าลง ทั้งยังเป็นตัวนำความร้อน ร้อนและเย็นได้เร็วเหมาะกับการใช้เป็นภาชนะในการแช่แข็งหรืออบด้วยความร้อน และยังทำให้การปิดผนึกด้วยความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีคุณภาพ มีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิกว้าง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในอลูมิเนียมฟอยล์จึงนำไปให้ความร้อน แล้วนำมาแช่แข็ง และให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งได้โดยไม่ต้องถ่ายภาชนะ ไม่ดูความชื้นและของเหลว จึงไม่หกตัว ย่นหรืออ่อนตัว โค้งงอได้จึงพับจีบ หรือขึ้นรูปได้ อยู่ตัวดี จึงนำมาใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น ใช้เป็นฝาปิดขวดนม

เครื่องคั่วและใช้ห่อเนย ขนมหัง ซ็อกโกเลต ลูกกวาด บุหรี่ ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน ได้ดี จึงเหมาะกับการใช้ห่ออาหารประเภทที่มีน้ำมัน เนยและเนยแข็ง จากสมบัติต่างๆ ของอลูมิเนียมฟอยล์ดังกล่าวมานี้จึงทำให้นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผลิตภัณฑ์อาหาร



ภาพที่ 2.10 อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)

2.7.1 อลูมิเนียมฟอยล์ แบบฟอยล์สองหน้า ฉนวนกันความร้อน อลูมิเนียมฟอยล์ชนิดสองหน้า (Double Sided Aluminium Foil) Venpac Foil 730 เป็นผลิตภัณฑ์กันความร้อนที่เหมาะสมกับ บ้าน โรงเรือน โรงงาน โรงแรม อาคารต่างๆ ทั้งใหม่และเก่า ฉนวนอลูมิเนียมฟอยล์ จักทำหน้าที่สะท้อนรังสีความร้อน (Reflectivity) จากดวงอาทิตย์ และยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำฝนที่จะไหลลงมาจากหลังคา Barrier มีความคงทน มีความยืดหยุ่นสูง ในงานหุ้มท่อระบบปรับอากาศตามโรงงาน โรงแรม หรืออาคารใหญ่ๆ มักนิยมใช้อลูมิเนียมฟอยชนิดสองหน้าปะทับบนฉนวนใยแก้วอีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นตัวกันไอน้ำ (Vapour Barrier) ที่เกิดจากความชื้นของระบบปรับอากาศเมื่อเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำ (Condensation)

Venpac Foil 730 เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนในการใช้ และมีอายุการใช้งานยาวนาน เพราะประกอบไปด้วย

1. อลูมิเนียมฟอยล์ 7 ไมครอน (Aluminium Foil 7 Micron)
2. การเรียงตัวของเส้นใยใน 3 ทิศทาง (3-way Fiberglass Scrim) เพื่อเสริมความเหนียวแน่น ทำให้ไม่สามารถฉีกขาดได้ง่าย
3. พอลิเอทิลีน (Polyethylene)
4. กระดาษคราฟท์ 60 แกรม (Kraft Paper 60 Graeme)

5. พอลิเอทิลีน(Polyethylene)

6. อลูมิเนียมฟอยล์7 ไมครอน (Aluminium Foil 7 Micron)

การใช้งาน ในกรณีใช้เป็นฉนวนกันความร้อน สำหรับหลังคา บ้าน อาคารต่าง ๆ ง่าย และสะดวกอย่างยิ่ง สามารถทำได้ด้วยตนเองในกรณีเป็นบ้านใหม่ หรือบ้านเก่าที่มีช่องให้ สามารถนำผลิตภัณฑ์เข้าไปได้ เพียงแต่หันด้านอลูมิเนียมฟอยล์ขึ้นข้างบนเพื่อรับรังสีความร้อน จากดวงอาทิตย์ และใช้อลูมิเนียมฟอยล์เทพเป็นตัวยึดติดกัน โดยให้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ซ้อนกัน สักเล็กน้อยเพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างในกรณีมีลม แผลงหรือสัตว์อื่นเล็ดลอดเข้าไปในช่องใต้หลังคา



ภาพที่ 2.11 อลูมิเนียมฟอยล์ แบบฟอยล์สองหน้า

อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตรา การเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกรานได้ง่ายขึ้น

2.7.2 อลูมิเนียมฟอยล์ - ฟิล์ม (Aluminium Foil – Film) ฉนวนกันความร้อน อลูมิเนียม ฟอยล์-ฟิล์ม Venpac Foil 710 เป็นผลิตภัณฑ์กันความร้อนที่เหมาะสมกับ บ้าน โรงเรือน โรงงาน โรงแรม อาคารต่างๆ ทั้งใหม่และเก่า ฉนวนอลูมิเนียมฟอยล์จะทำหน้าที่สะท้อนรังสีความร้อน (Reflectivity) จากดวงอาทิตย์ และยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำฝนที่จะ ไหลลงมาจากหลังคา Barrier มีความคงทน มีความยืดหยุ่นสูง

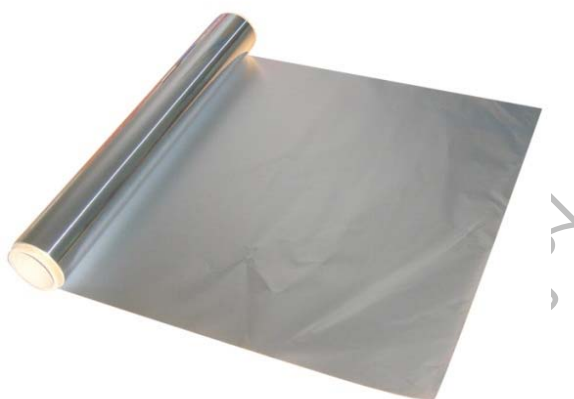
Venpac Foil 710 เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนในการใช้ และมีอายุการใช้งานยาวนาน ประกอบไปด้วย

1. อลูมิเนียมฟอยล์7 ไมครอน (Aluminium Foil 7 Micron)
2. การเรียงตัวของเส้นใยใน 3 ทิศทาง(3-way Fiberglass Scrim) เพื่อเสริม ความเหนียวแน่น ทำให้ไม่สามารถฉีกขาดได้ง่าย
3. พอลิเอทิลีน(Polyethylene)

4. กระดาษคราฟท์ 60 แกรม (Kraft Paper 60 Graeme)
5. พอลิเอทิลีน (Polyethylene)
6. Metallized ฟิล์ม 12 ไมครอน (Metallized Film 12 Micron)

คุณลักษณะพิเศษ เนื่องจาก Venpac Foil 710 ประกอบไปด้วยด้านหนึ่งเป็น Metallized Film 12 micron จึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปใช้กันความร้อนได้หลังคาของฟาร์มเลี้ยงสัตว์ต่างๆ เพราะสามารถฉนวนทำความสะอาดได้

การใช้งานง่ายและสะดวกสบายต่อการติดตั้งทั้ง บ้าน โรงเรือน โรงงาน โรงแรม และ อาคารต่างๆ ทั้งเก่าและใหม่

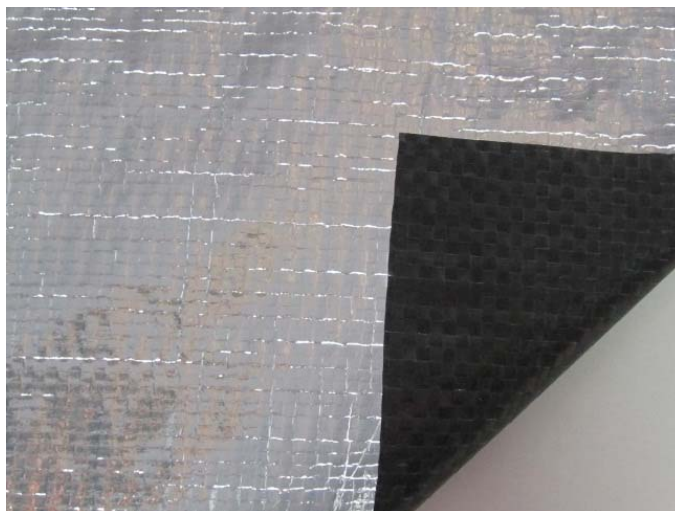


ภาพที่ 2.12 อลูมิเนียมฟอยล์ - ฟิล์ม (Aluminium Foil – Film)

2.7.3 แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์แบบหน้าเดียว ฉนวนกันความร้อน อลูมิเนียมฟอยล์ Venpac Foil 435 เป็นผลิตภัณฑ์กันความร้อนที่เหมาะสมกับ บ้าน โรงเรือน โรงงาน โรงแรม อาคารต่างๆ ทั้งใหม่และเก่า ฉนวนอลูมิเนียมฟอยล์จัดทำหน้าที่สะท้อนรังสีความร้อน (Reflectivity) จากดวงอาทิตย์ และยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำที่จะไหลลงมาจากหลังคา Barrier มีความคงทน มีความยืดหยุ่นสูง เพราะในตัวผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยวัสดุอีก 3 ชั้นประกอบกันเป็นชั้นเดียวกัน ซึ่งได้แก่

1. อลูมิเนียมฟอยล์ 7 ไมครอน (Aluminium Foil 7 Micron)
2. การเรียงตัวของเส้นใยใน 3 ทิศทาง (3-way Fiberglass Scrim) เพื่อเสริมความเหนียวแน่น ทำให้ไม่สามารถฉีกขาดได้ง่าย
3. กระดาษคราฟท์ 60 แกรม (Kraft Paper 60 Graeme)

การใช้งานง่ายและสะดวกอย่างยิ่ง สามารถทำได้ด้วยตนเองในกรณีเป็นบ้านใหม่ หรือ บ้านเก่าที่มีช่องโหว่ให้สามารถนำผลิตภัณฑ์เข้าไปได้ เพียงแต่หันด้านอลูมิเนียมฟอยล์ขึ้นข้างบนเพื่อ รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ และใช้อลูมิเนียมฟอยล์เทพเป็นยัดติดกัน โดยให้แผ่นอลูมิเนียม ฟอยล์ซ้อนกันสักระยะน้อยเพื่อ ไม่ให้เกิดช่องว่างในกรณีมีลม แผลงหรือสัตว์อื่นเล็ดลอดเข้าไปใน ช่องใต้หลังคา



ภาพที่ 2.13 แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แบบหน้าเดียว

2.8 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) <http://siammetalliczone.com>[15]มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า พอลิเอ ทิลีน (Polyethylene : PE) โดยทั่วไปแล้ว พอลิเอทิลีน มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่ายมีความหนาแน่น ต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูง ขึ้นจะทำให้มีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการ เสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกรานได้ง่ายขึ้น

สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีน

1. ยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ
2. มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมาก
3. ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี
4. หดตัวแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย
5. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก

6. ผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสงได้
7. ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส

2.8.1 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) พอลิโพรไพลีน มีลักษณะขาวขุ่น ทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน มีความหนาแน่นใน ช่วง $0.890-0.905\text{g/cm}^3$ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลอยน้ำได้ เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน ลักษณะอื่น ๆ คล้ายกับพอลิเอทิลีน

สมบัติทั่วไป

1. มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วนคงตัวไม่เสียรูปร่าง
2. สามารถทำเป็นบานพับในตัว มีความทนทานมาก
3. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง
4. ทนทานต่อสารเคมีส่วนมากแต่สารเคมีบางชนิดอาจทำให้พองตัว หรืออ่อน

นุ่มได้

5. มีความเหนียวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 105°F ไปจนถึง 15°F (40°C ถึง -10°C)

แต่ที่ 0°F จะเปราะ

6. มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี
7. สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Sterilization : 100°C) ได้
8. ผสมสีได้ง่ายทั้งลักษณะโปร่งแสงและทึบแสง

2.8.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride : PVC) พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญที่สุดในกลุ่มไวนิลด้วยกัน มักเรียกกันทั่วไปว่าพีวีซี เนื้อพีวีซีมีลักษณะขุ่นทึบแต่ก็สามารถผลิตออกมาให้มีสีกันได้ทุกสีเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี ตัวมันเองเป็นสารที่ทำให้ไฟดับจึงไม่ติดไฟ มีลักษณะทั้งที่เป็นของแข็งคง รูปและอ่อนนุ่มเหนียว เรซินมีทั้งที่เป็นเม็ดแข็ง หรืออ่อนนุ่ม และเป็นผงจึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

สมบัติทั่วไป

1. มีความแข็งแรงดี ทนทานต่อสภาวะอากาศและสิ่งแวดล้อมปกติ
2. ต้านทานต่อสารเคมีและน้ำ
3. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
4. สามารถผสมสีและแต่งสีได้อย่างไม่จำกัด
5. สามารถเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรุงแต่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่แข็ง

และคงตัว จนถึงอ่อนนุ่ม และยืดหยุ่นมากๆ

6. มีสมบัติอื่นๆ กว้างขวางและสามารถสลายตัวเอง

2.8.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)

<http://greeniebag.blogspot.com> [16]มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ($0.910 - 0.925 \text{ g/cm}^3$) ใช้ผลิตเป็นเครื่องบรรจุหีบห่อ เช่น ถุงเย็น ของใส่อาหาร ทางด้านการเกษตรใช้ทำเป็นโรงอบพลังแสงอาทิตย์ โรงเพาะชำ เมทฟิล์มกันวัชพืช ท่อน้ำหยด ฟิล์มปลูกกันซึม เช่น บ่อน้ำ พื้นถนน ทางด้านงานนิคมจะทำเป็นพวงของเล่น ของใช้ในบ้านและทำเป็นฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล นอกจากนี้ยังใช้ทำวัสดุ เคลือบผิวและใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่าทำพวกขวดพลาสติกชนิดบีบได้ ทางด้านความใส LDPE จะสู้ PP ไม่ได้ โดยเฉพาะวงการการกั้เม้นท์LDPE ยังไม่สามารถเข้าไปแทนที่ PP ได้ แต่บางชิ้นงานต้องการความเหนียวและความคงทน มักจะใช้ LDPE แทน PP เพราะ PP กรอบแตกง่ายเมื่อใช้ไปนาน ๆ ทางด้านการเกษตรก็พบปัญหาการกรอบแตกของฟิล์ม PVC เมื่อโดนแสงแดดจึงหันมาใช้ LDPE แทนพอลิเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)เป็น พอลิเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง ซึ่งค่าความหนาแน่นของวัสดุนั้นต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.950 g/cm^3 ละมีอัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว (Melt Flow Rate) ของเนื้อวัสดุขณะหลอมเหลว หน่วยเป็นKg/s สมบัติทั่วไป

1. จุดหลอมเหลว (Temperture Melt: Tm)ประมาณ 130°C
2. มีความทนต่อแรงดึงสูงกว่า LDPE
3. เนื้อต่อปฏิกิริยาเคมี
4. ละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิดที่อุณหภูมิ 100°C แต่จะละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิห้อง
5. อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะนานๆ Max 100°C
6. ทนกรด ค่าง ได้ดี
7. เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density) ($0.910 - 0.925 \text{ g/cm}^3$)
8. สามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดผนึกได้ดี
9. สามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดผนึกได้ดี
10. เหนียว ไม่กรอบแตกง่าย แต่ความแข็งและทนทานน้อยกว่า HDPE (High Density Polyethylene)
11. โปร่งใส มีความใส่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ PP แต่ใสกว่า HDPE (High Density Polyethylene) ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ทนต่อกรดและด่างได้ดี
12. ป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี



ภาพที่ 2.14 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

ที่มา: A.Brent Strong.,2000“Hight Density Polyethylene (HDPE)” ,Plastics Materials and Processing, No.198 [17]

2.8.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)

<http://siammetalliczone.com>[18] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.93–0.95 g/cm³ MDPE สามารถผลิต ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts), Ziegler-Natta Catalysts หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาของเมทัลโล (Metallocene Catalysts) MDPE มีข้อดีและปด้อยความต้านทานสมบัติ นอกจากนี้เป็นรอยเว้า่น้อย มีความสำคัญว่า HDPE มีความต้านทานการถอดความเครียดดีกว่า HDPE และ MDPE ตามปกติจะถูกใช้ในการทำ ท่อแก๊ส และ อุปกรณ์ (Sacks)ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ สมบัติทั่วไป

1. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ 0.926-0.953g/cm³
2. ผลึกจาก 70% -80% น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ 200,000 แรงดึงจาก

8 – 24 MPa

3. ยืดเมื่อขาดจาก 50% -60% อุณหภูมิของการบิดเบือนความร้อน

(0.46 MPa) 49-74 °C

2.8.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 0.97 g/cm³ โมเลกุลของ HDPE จะมีแบ็กโบนคาร์บอนที่ยาวมากแต่ไม่มีไซด์กรุป ผลก็คือ โมเลกุลเหล่านี้เชื่อมกันอย่างแน่นหนามากขึ้น HDPE แข็งแรงกว่า แข็งกว่า และโปร่งแสงน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ HDPE ใช้ทำถุง ถังน้ำมันรถ หีบห่อและท่อน้ำ เป็นต้น

สมบัติพอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)

1. จุดหลอมเหลว (Temperture melt: Tm)ประมาณ 140 °C– 220 °C มีความทนต่อแรงดึงสูงกว่าLDPE

2. เชื้อต่อปฏิกิริยาเคมี
3. ละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิดที่อุณหภูมิ 140 °C แต่จะไม่ละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิห้อง
4. อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะนานๆ สูงสุดไม่เกิน 100°C
5. ทนกรด ค่าง ได้ดีคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง



ภาพที่ 2.15 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

ที่มา: A.Brent Strong.,2000“Hight Density Polyethylene (HDPE)”,Plastics Materials and Processing, No.198 [19]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene

ลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene	
	Low Density
ความหนาแน่น (Density)	0.918 – 0.935 g/cm ⁻³
ความแข็งของพื้นผิว (Surface Hardness)	SD48
ค่าสัมประสิทธิ์แรงคด (Flexural Modulus)	0.35 GPa
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature)	130 – 200 °C
อุณหภูมิที่สามารถใช้งานวัสดุพอลิเมอร์ได้	(-30) – 70°C
การขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion)	20×10 ⁻⁵ /°C
ความสามารถในการดูดซึมน้ำ	0.01%
ระยะยืดจนขาด (Elongation at Break)	500%
อุณหภูมิสูงสุด (Max. Operating Temp)	50 °C
ดัชนีของออกซิเจน (Oxygen Index)	17 %
ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)	10 ¹⁶ ohm·cm

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene (ต่อ)

ลักษณะทางกายภาพของ	
Polyethylene	
Low Density	
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า(Dielectric Strength) 25 MV/m	
ตัวประกอบการสูญเสีย	909090
(Dissipation factor 1 kHz)	
การหดตัว (Shrinkage) 1.5 – 3%	
ทนกรดอ่อนได้	
ทนด่างอ่อน – แก่	ได้
ทนสารละลาย ได้ต่ำกว่า 100 °C	

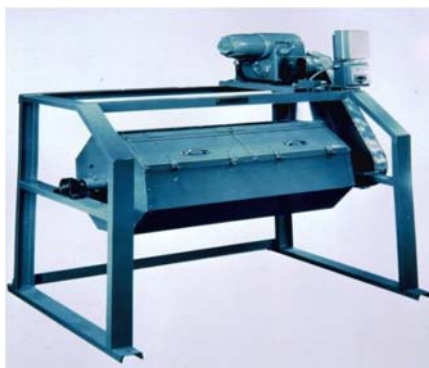
ที่มา :<http://www.vickerpigment.com> [20]

2.9 การผสม(Mixing)รศ.บรรเลง ศรีนิล[21]ได้กล่าวไว้ว่าการผสมเป็นการนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและให้เนื้อเข้ากันได้แก่การผสมสารเติมแต่งกับพลาสติกซึ่งส่วนใหญ่เป็นการผสมของแข็งกับของแข็งหรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสม (Mixer หรือ Blender) โดยทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่กระแทกเสียดสีและคลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการด้วยการหมุนของใบกวนในถังเปิดหรือปิดผลของการผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุต่างชนิดกันเข้ากันอย่างทั่วถึงแต่ยังคงสามารถแยกอนุภาคของสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจนเครื่องผสมที่ใช้ในการผสมมีลักษณะการผสมแบบกะ (Batch Mixer) ซึ่งเกิดการผสมโดยการทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันโดยไม่ให้พลาสติกได้รับแรงเหวี่ยงมากนักเทคนิคการผสมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือการผสมแบบเย็น (Cold Mixing) และการผสมแบบร้อน (Hot Mixing)

2.9.1 การผสมแบบเย็น (Cold Mixing) เทคนิคการผสมแบบนี้เป็นการผสมจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องสามารถใช้ผสมพลาสติกและสารเติมแต่งที่มีขนาดอนุภาคต่างกันตัวอย่างเครื่องผสมแบบผสมเย็นเช่น

2.9.1.1 เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum Tumbler) เครื่องผสมแบบถังหมุนทำให้เกิดการผสมของสารเติมแต่งชนิดต่างๆกับพลาสติกเข้าด้วยกันโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและการหมุนเหวี่ยงของถังหมุนซึ่งแรงเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของสารต่างๆเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเครื่องผสมชนิดนี้มีหลายแบบแต่แบบที่นิยมใช้และราคาถูกที่สุดคือเครื่องผสมแบบถังหมุนปกติ (Tumbling Barrel) มักใช้สำหรับการผสมสารเติมแต่งปริมาณไม่มากลงในพลาสติก

ประกอบด้วยถังผสมขนาดประมาณ 130-210 L ซึ่งถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพการผสมขึ้นกับปริมาณวัสดุและเวลาที่ใช้ในการผสมนอกจากนี้ยังมีเครื่องผสมแบบถังหมุนแบบอื่นๆที่ให้การผสมเข้ากันได้ดีกว่าเนื่องจากการหมุนและการเหวี่ยงของถังผสมในเวลาเดียวกัน เช่นถังหมุนแบบกรวยคู่ (Double Cone Mixer) และถังหมุนแบบรูปตัววี (V-Shape Mixer) เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 เครื่องผสมแบบถังหมุนปกติ



ภาพที่ 2.17 เครื่องผสมแบบถังหมุนแบบกรวยคู่(Double Cone Mixer)



ภาพที่ 2.18 เครื่องผสมแบบถังหมุนแบบรูปตัววี (V-Shape Mixer)

2.9.1.2 เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon Blender) เครื่องผสมแบบริบบอนมีตัวกวนผสมซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะขาควนคล้ายสปริงเรียกว่าริบบอนบรรจุอยู่ในถังผสมที่ยึดติดอยู่กับที่แผ่นริบบอนนี้ถูกยึดติดกับเพลาคับที่สามารถหมุนด้วยความเร็วประมาณ 20-60 รอบต่อนาทีเครื่องผสมแบบนี้นิยมใช้ในการผสมวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือก้อนเล็กๆ โดยทั่วไปในขณะที่ทำการผสมจะไม่เกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากขณะทำการผสมจะไม่เกิดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุและระหว่างริบบอนกับผนังของถังผสม



ภาพที่ 2.19 เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon Blender)

2.9.1.3 เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical Screw Mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยถังผสมที่มีลักษณะเป็นกรวยกลมและมีสกรูบรรจุอยู่ภายในถังโดยวางแนบอยู่ใกล้กับผนังของถังผสมสกรูนี้สามารถหมุนได้ 2 ลักษณะคือหมุนรอบแกนสกรูและหมุนเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวงของถังความเร็วในการหมุนสามารถปรับเปลี่ยนได้เครื่องผสมแบบนี้สามารถผสมสารที่มีปริมาณเล็กน้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.20 เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical Screw Mixer)

2.9.2 การผสมแบบร้อน (Hot Mixing) เทคนิคการผสมแบบนี้มีการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ทำการผสมโดยอุณหภูมิของห้องผสมอาจสูงถึง 140°C ดังนั้นสารเติมแต่งบางชนิดอาจหลอมแล้วกระจายตัวเข้าไปในพลาสติกซึ่งยังคงสถานะเป็นของแข็งตัวอย่างเครื่องผสมแบบนี้ ได้แก่ เครื่องผสมเทอร์บูแลนต์ (Turbulent Mixer) ซึ่งประกอบด้วยถังผสมร้อนและถังหล่อเย็น ภายในถังผสมร้อนมีใบพัดกวนที่มีความเร็วสูงเป็นตัวช่วยในการผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันหลังจากผสมกันแล้วจะถ่ายของผสมร้อนลงในถังหล่อเย็นเพื่อทำให้ของผสมร้อนเย็นตัวลงเหลือประมาณ 35°C ระยะเวลาผสมของเครื่องผสมแบบนี้สั้นมากคือประมาณ 10 นาทีต่อครั้ง ขนาดของเครื่องผสมร้อนโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1,000-1,500 Liter และเครื่องผสมเย็นประมาณ 2,000-3,000 Liter



ภาพที่ 2.21 เครื่องผสมเทอร์บูแลนต์ (Turbulent Mixer)

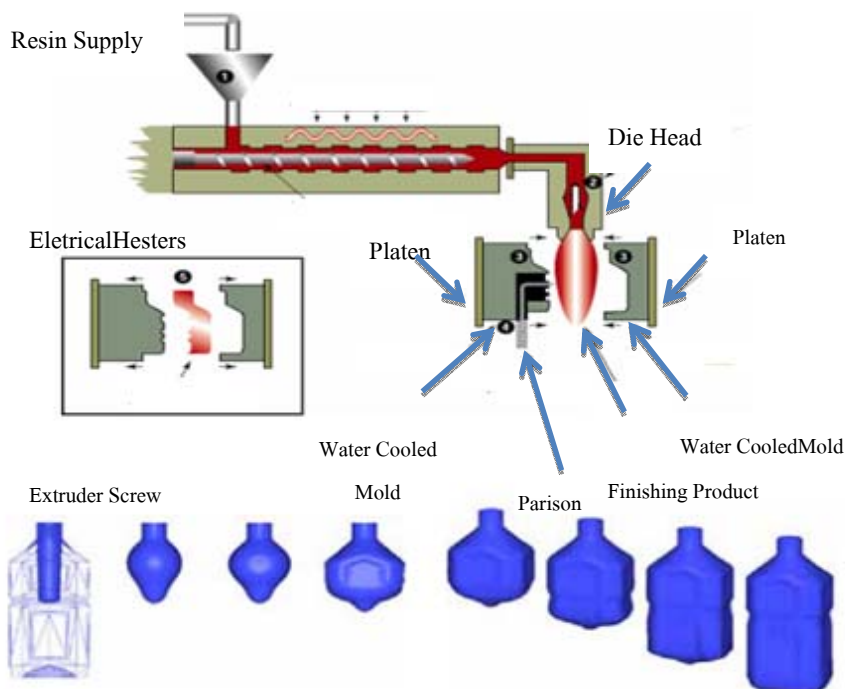
2.10 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) การอัดขึ้นรูปปฏิเวธ จันเพชร และ นครศ กงทอง [22] ได้กล่าวไว้ว่าในการเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์วัสดุผสมนี้ ผู้จัดทำได้ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ซึ่งเป็นเทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์ที่เก่าแก่เทคนิคหนึ่งแต่ยังมีการใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคนี้ในการอัดเบ้าพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตและยางเพื่อขึ้นรูปนอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเพื่อขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกที่ทำการแปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยากเช่นการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมเส้นใยไฟเบอร์ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Fiber Glass) และ เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เป็นต้นและนอกจากนี้ยังนิยมใช้การอัดขึ้นรูปในการแปรรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers) อีกด้วยโดยหลักการทำงานของกระบวนการอัดขึ้นรูปเริ่มจากการยึดแม่พิมพ์ติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นแล้วให้

ความร้อนโดยตั้งตามอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงตามชนิดของพลาสติกที่ใช้ โดยทั่วไปอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Cavity) จะอยู่ในช่วง 140-200 °C หลังจากนั้นเติมเม็ดวัสดุผสมที่ได้ผสมกับสารเติมแต่งชนิดต่างๆและเตรียมให้อยู่ในลักษณะผงหรือเม็ดโดยเติมปริมาณของเม็ดวัสดุผสมให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดแม่พิมพ์โดยใช้แรงอัดที่เหมาะสม เนื่องจากเม็ดวัสดุผสมร้อนขึ้นจะเกิดการอ่อนตัวและผลจากการใช้แรงอัดทำให้วัสดุจะเกิดการไหลไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ลักษณะเดียวกันและจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหลังจากนั้นปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระยะเวลาหนึ่งกล่าวคือตามระยะเวลาของการเชื่อมโยงของพลาสติกนั้นๆ หลังจากนั้นเปิดแม่พิมพ์ (Cavity) นำชิ้นงานออกขณะร้อนและใส่ชิ้นงานในช่องหล่อเย็นแล้วกดปุ่มอัดเพื่อทำการหล่อเย็นจากนั้นจึงนำชิ้นงานออก

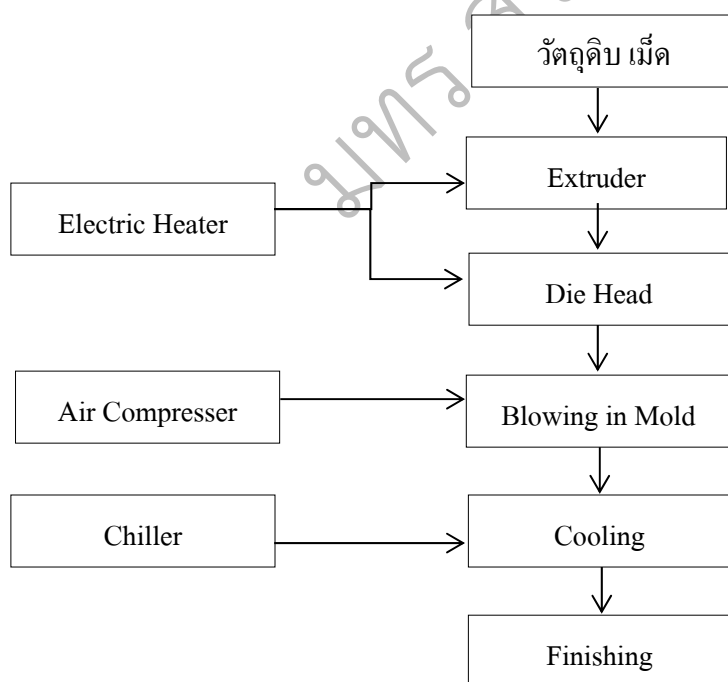
2.10.1 การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ (Polymer Processing) <http://epg.science.cmu.ac.th/> [23] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าเทคโนโลยีการเปลี่ยนพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์คอมพาวนด์ (Polymer Compound) ให้เป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆในการทำให้พลาสติกเกิดเป็นรูปร่างต่างๆนั้นต้องทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะของไหลโดยอาจทำให้พลาสติกเกิดการหลอมด้วยความร้อนหรือทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะสารละลายทั้งนี้เพื่อให้พลาสติกสามารถเกิดเป็นรูปร่างต่างๆตามลักษณะชิ้นส่วนที่ควบคุมการเกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์พลาสติกเช่นแม่แบบหรือหัวตายหลังการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจะต้องผ่านกระบวนการหล่อเย็นเพื่อให้สามารถคงรูปร่างได้โดยในพลาสติกประเภทเทอร์มอพลาสติกจะเกิดการแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็นในขณะที่พลาสติกประเภทเทอร์โมเซตจะเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Cross linking) กระบวนการผลิตหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกมีหลายวิธีแต่วิธีที่สำคัญและนิยมทำกันในงานอุตสาหกรรมพลาสติกได้แก่ การฉีดพลาสติก (Injection Molding) การอัดรีด (Extrusion) การอัด (Compression Molding) การถ่ายโอน (Transfer Molding) การเป่า (Blowing) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การรีด (Calendering) การอัดแบบชนิดหมุน (Rotation Molding) และการหล่อ (Casting) เป็นต้น

2.10.2 กระบวนการเป่า (Blow Molding) คือ เป็นการเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกโดยเริ่มจากวัตถุดิบคือ เม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene (HDPE)) (ส่วนใหญ่) PP, PE เป็นต้น นำเม็ดพลาสติกมาหลอมในเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยใช้ความร้อนจาก เครื่องทำความร้อน (Heater) ไฟฟ้าจากนั้นสกรูจะอัดพลาสติกเหลวโดยใช้หลักการขับเคลื่อนสกรูและการปิด-เปิด Mold ด้วยระบบ ไฮดรอลิก (Hydraulics) ส่งผ่าน หัวแม่พิมพ์ (Die Head) ออกมาเป็นลักษณะทรงกระบอก (Parison) จากนั้นแม่พิมพ์ (Mold) จะเคลื่อนตัวมาประกบแล้วเป่าลม โดยใช้อากาศอัด เพื่อให้เนื้อพลาสติกขยายเต็มตาม แม่พิมพ์ (Mold) เมื่อเต็มแม่พิมพ์

(Mold)แล้วจะมีน้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) ไหลมาหล่อเย็นเพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวทรงรูปตามแม่พิมพ์ที่ต้องการ ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 การขึ้นรูปแบบ Blow Moldin

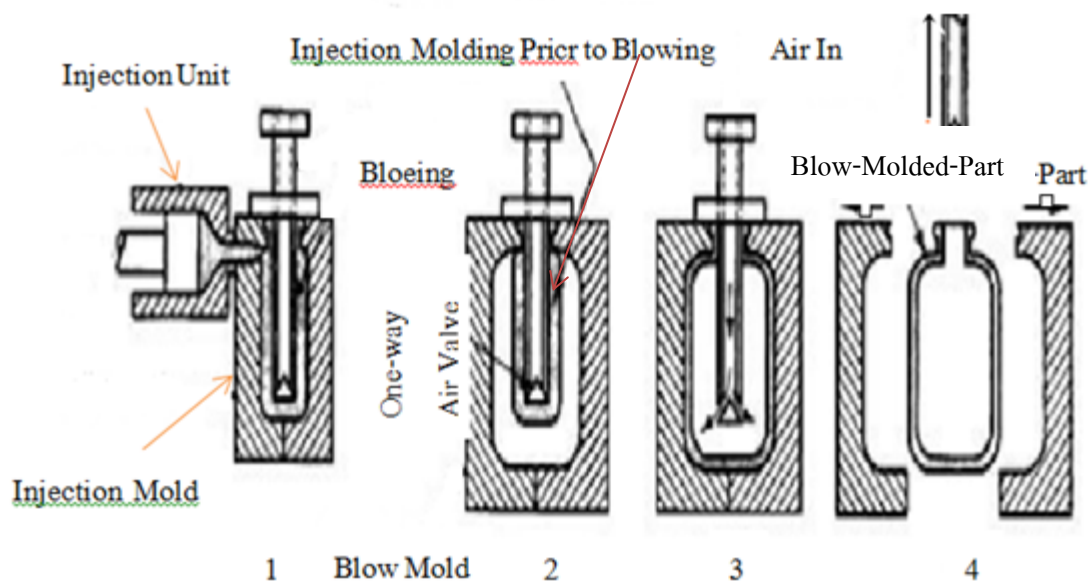


แผนภูมิที่ 2.1 กระบวนการการเป่า(Blow Molding)

2.10.3 การเป่ายืด (Stretch Blow Molding) เป็นกระบวนการผลิตขวดบรรจุภัณฑ์เหมือนกัน ซึ่งการขึ้นรูปแบบนี้จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ภาชนะพลาสติก เพราะมีความหนาเฉลี่ยที่แน่นอน, ลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เพราะเกิดของเสียน้อยและยังได้ภาชนะที่ไม่มีตะเข็บรอยต่อตรงคอและก้นของภาชนะจึงทำให้มีคุณภาพสูงกว่า การขึ้นรูปแบบกระบวนการการเป่า (Blow Molding) ซึ่งการขึ้นรูปแบบการเป่ายืด (Stretch Blow Molding) จะแบ่งขั้นตอนการผลิตออกเป็น 2 ส่วน คือ การฉีดเพื่อให้เป็น Pre-Form แล้วจึงนำ Pre-Form ที่ได้ไปเข้าสู่ขั้นตอนการเป่ายืด (Stretch Blow) เพื่อขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ต่อไป

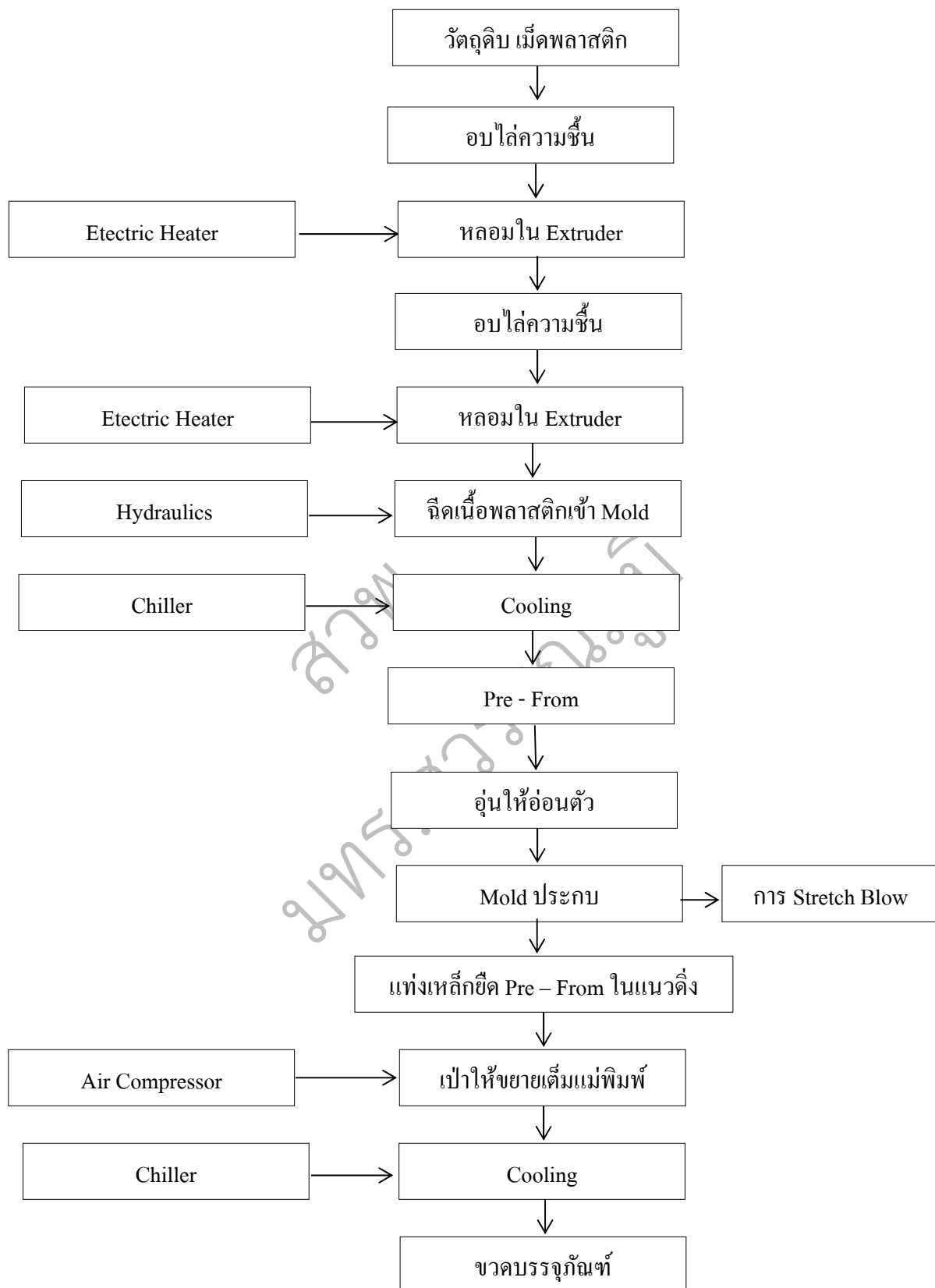
การฉีด (Injection Molding) คือ ใช้หลักการขับเคลื่อนสกรูและการปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Mold) ด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulics) หรือใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มจากวัตถุดิบเม็ดพลาสติก ส่วนใหญ่เป็นชนิด พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate : PET) จากนั้นนำไปหลอมในเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยใช้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (Heater) ไฟฟ้า จากนั้นสกรูจะอัดสูงผ่าน หัวปลายกระบอกฉีด (Nozzle) ผ่านทางวิ่ง (Runner) เข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold) (ซึ่งการผลิต Pre-Form ส่วนใหญ่จะใช้ทางวิ่งร้อน (Hot Runner) เพื่อลดปริมาณของเสีย เมื่อเนื้อพลาสติกไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ (Mold) จะมีน้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) ไหลผ่านแม่พิมพ์ (Mold) เพื่อให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัว จากนั้น แม่พิมพ์ (Mold) จะเปิดออกเพื่อให้น้ำชิ้นงานออก

การ Stretch Blow คือ เป็นการเป่าขึ้นรูปขวดโดยใช้วัตถุดิบคือ Pre-form จากการฉีด นำมาอุ่นให้ Pre-form อ่อนตัว จากนั้นแม่พิมพ์ (Mold) จะมาประกบ แล้วจะมีแท่งเหล็กกดก้นตัว Pre-form ให้ยัดลงในแนวตั้งแล้วทำการเป่าให้ขยายเต็มแม่พิมพ์ จากนั้นจะมีน้ำเย็นไหลผ่านแม่พิมพ์ (Mold) เพื่อให้ขวดแข็งตัวคงรูป แล้วเปิดแม่พิมพ์ (Mold) ปลดขวดออกมาเป็นอันเสร็จสิ้น รายละเอียดดังภาพที่ 2.23



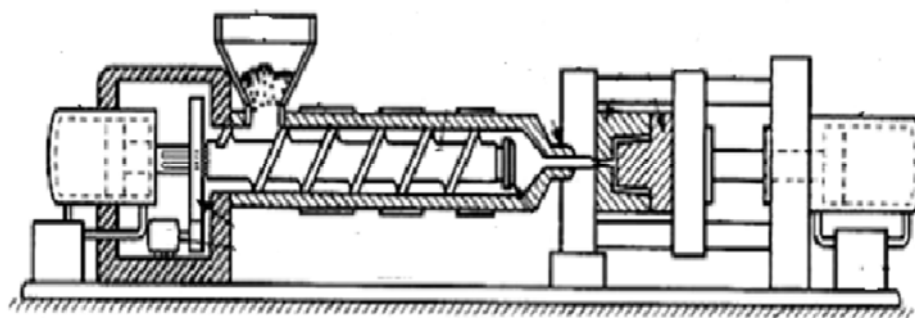
ภาพที่ 2.23 การขึ้นรูปแบบการเป่ายืด (Stretch Blow Molding)

2.10.4 กระบวนการอัด(Compressed Molding)เป็นการขึ้นรูปโดยการนำผงพลาสติกที่แข็งตัวมาอัดในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้กระบวนการนี้คือ ผงเมลามีน(Melamine)ขั้นตอนการผลิตทำ โดย เริ่มจากนำผงพลาสติกมาซึ่งให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นและเป็นการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปใส่แม่พิมพ์เพื่อเริ่มปิดแม่พิมพ์อัดให้พลาสติกแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์จะเริ่มชลอช้าลงเพื่อให้พลาสติกได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น เมื่อถึงตำแหน่งสุด จะถึงช่วงเวลาแข็งตัวของพลาสติกเองโดยไม่ต้องใช้น้ำเย็น จากนั้นก็เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกได้การอัดร้อน

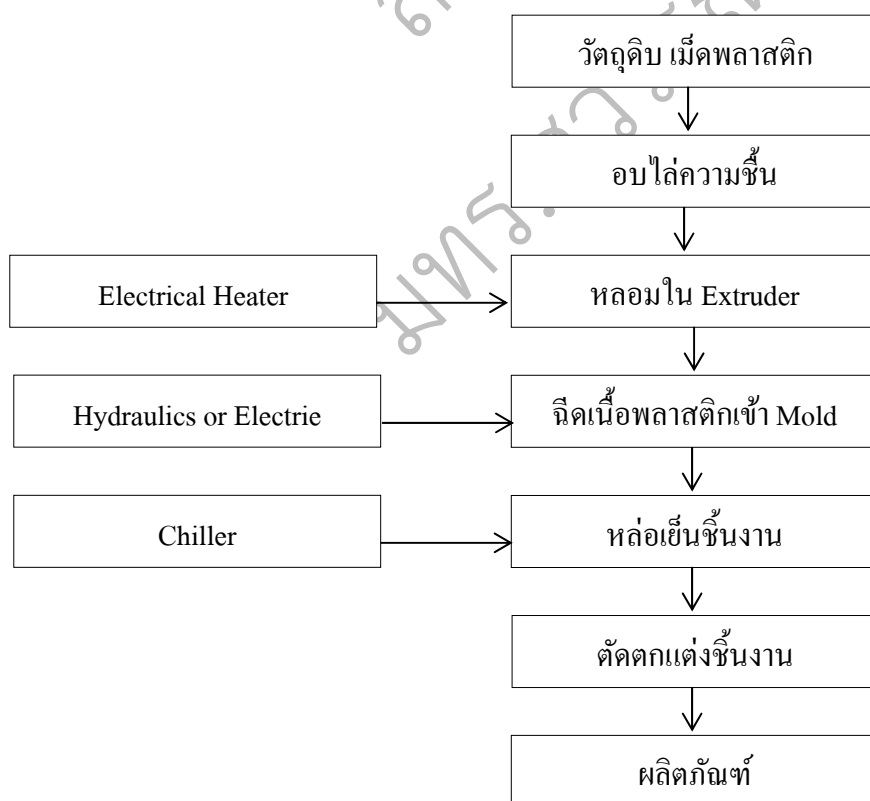


แผนภูมิที่ 2.2 กระบวนการผลิต Stretch Blow Molding

2.10.5 กระบวนการฉีด (Injection Molding) การขึ้นรูปแบบฉีด จะเริ่มจากวัตถุดิบเป็นเม็ดพลาสติกหรือเป็นผงก็ได้ลงในกรวยเติม จะถูกเกลียวหนอนหมุนส่งไปยังด้านหน้าของกระบอกสูบ ซึ่งมีแผ่นความร้อนไฟฟ้า(Electrical Heater) ทำให้พลาสติกหลอมเหลว หลังจากนั้นจะเคลื่อนเกลียวหนอนให้ดันพลาสติกผ่านหัวฉีดไปเข้าแม่พิมพ์(Mold) ซึ่งปิดอยู่แม่พิมพ์ซึ่งจะมีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นที่ผลิตจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) เพื่อให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัวสามารถถอดออกจากแบบได้ในระยะเวลาสั้น จากนั้นจะส่งไปตกแต่งชิ้นงานต่อไป ดังภาพที่ 2.24

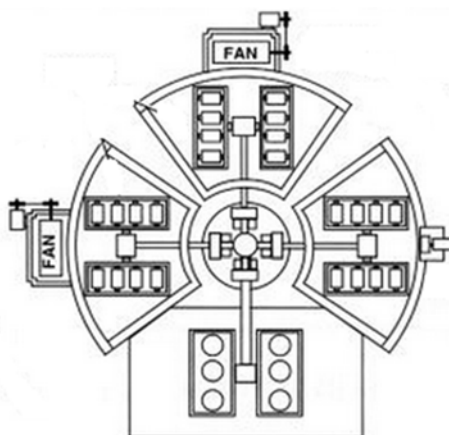


ภาพที่ 2.24 กระบวนการฉีด (Injection Molding)



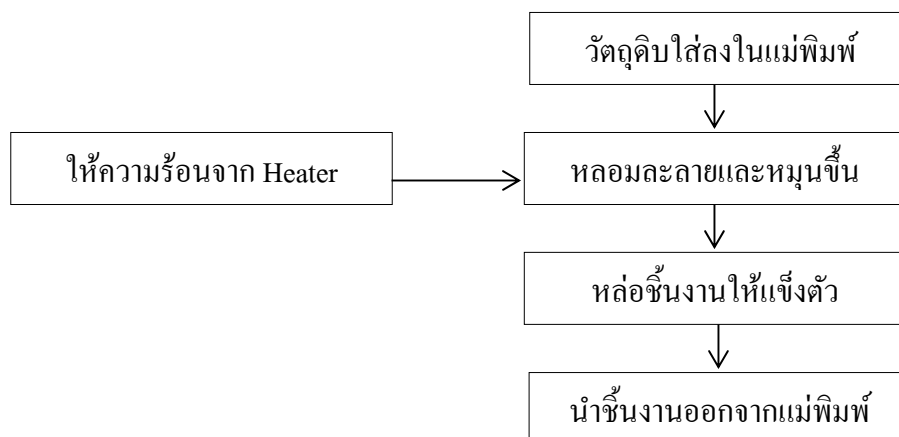
แผนภูมิที่ 2.3 กระบวนการฉีด(Injection Molding)

2.10.6 กระบวนการหมุน(Rotational Molding)การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยวิธีหมุน เหมาะสำหรับผลิตชิ้นงานภายในกลวงขนาดใหญ่ซึ่งจะได้ชิ้นงานที่ไม่มีความเค้น ผิวงานเรียบร้อย ระยะเวลาการผลิตต่ำ และมีความหนาสม่ำเสมอ หลักการทำงานของ การขึ้นรูปแบบนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ดังนี้ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบหมุน(Rotational Molding)

1. การใส่วัตถุดิบ (Loading) วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกพวเทอร์โมพลาสติก อาจจะมีลักษณะเป็นของเหลว หรือ เป็นผงก็ได้นำมาใส่เข้าไปในแม่พิมพ์กลวงหลังจากนั้นปิดฝาประกบแม่พิมพ์
2. การขึ้นรูปหรือการหลอมละลาย (Molding หรือ Curing) ย้ายแม่พิมพ์เข้าไปยังห้องร้อน เพื่อนำไปหมุนสองแกนพร้อมทั้งให้ความร้อนเพื่อให้พลาสติกเหลว และไหลเกลี่ยไปตามผิวภายในของแม่พิมพ์จนทั่วถึง ด้วยแรงโน้มถ่วง (ไม่ใช่แรงเหวี่ยง)
3. การทำให้เย็น (Cooling) ย้ายไปยังห้องเย็นโดยอาจจะใช้อากาศเย็น หรือน้ำเย็นพ่นใส่แม่พิมพ์แต่แม่พิมพ์จะต้องยังคงหมุนอยู่เพื่อลดการหดตัวของชิ้นงานขณะทำการหล่อเย็น
4. การนำเอาชิ้นงานออก (Unloading)จากนั้นเมื่อชิ้นงานแข็งตัวและคงรูปแล้วก็สามารถเปิดแม่พิมพ์ออก เพื่อนำชิ้นงานออกได้

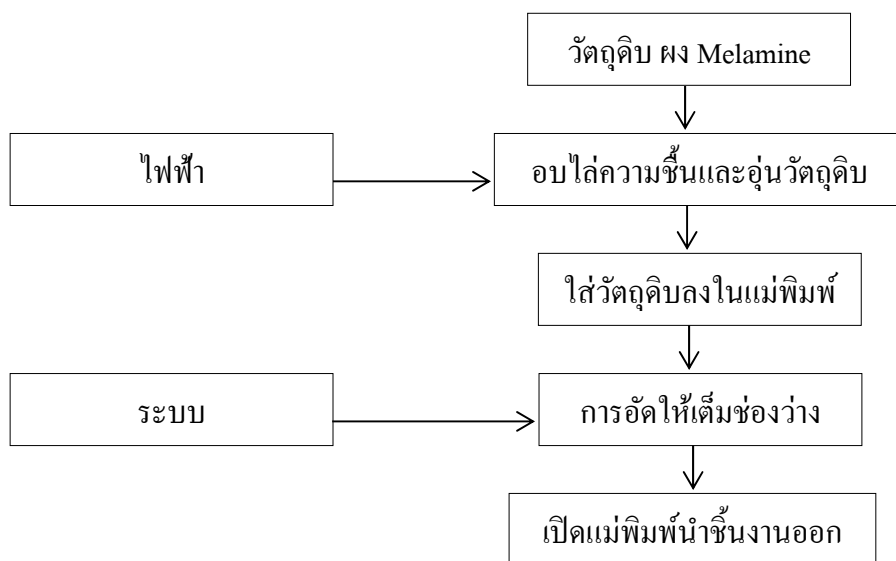


แผนภูมิที่ 2.4 กระบวนการหมุน(Rotational Molding)

2.10.7 กระบวนการอัด(Compressed Molding)เป็นการขึ้นรูปโดยการนำผงพลาสติกที่แข็งตัวมาอัดในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้กระบวนการนี้คือ ผงเมลามีน (Melamine) ขั้นตอนการผลิตทำโดย เริ่มจากนำผงพลาสติกมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นและเป็นการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปใส่แม่พิมพ์พอเริ่มปิดแม่พิมพ์อัดให้พลาสติกแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์จะเริ่มชลอช้าลงเพื่อให้พลาสติกได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น เมื่อถึงตำแหน่งสุด จะถึงช่วงเวลาแข็งตัวของพลาสติกเองโดยไม่ต้องใช้น้ำเย็น จากนั้นก็เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกโดยการอัดร้อน



ภาพที่ 2.26 ลักษณะเครื่องอัดและการขึ้นรูปแบบกระบวนการอัด(Compress Molding)

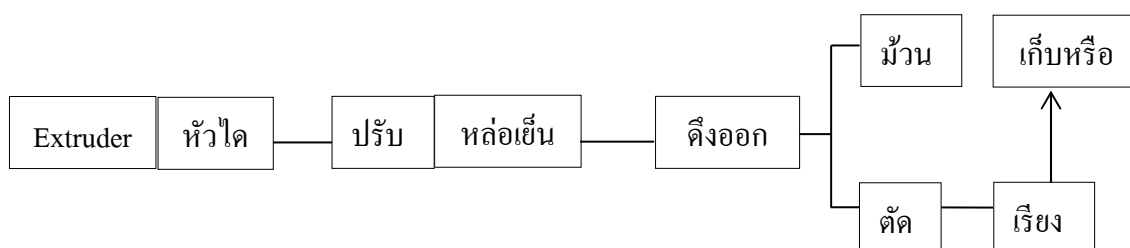


แผนภูมิที่ 2.5 กระบวนการอัด(Compressed Molding)

2.10.8 การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ปฏิเวช จันเพชร [24] กล่าวว่า กลุ่มกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ที่สามารถจัดรวมเข้าด้วยกันได้ซึ่งจะประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

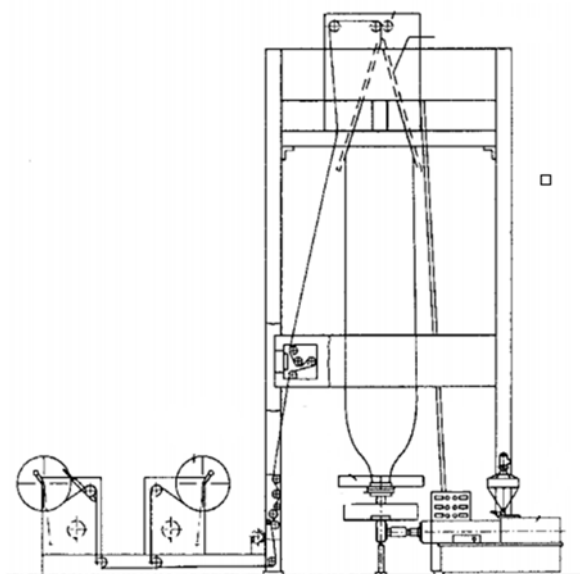
1. Blown Film Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ ถุงพลาสติก
2. Film Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ แผ่นฟิล์มบาง
3. Sheet Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ เสื่อน้ำมัน, หนังสือพิมพ์
4. Pipe/tube Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ ท่อ PVC, ท่อน้ำ
5. Profile Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ รางสายไฟ, ขอบหน้าต่าง
6. Tape Yarn / Filament Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ กระสอบ พลาสติก

หมายเหตุ: Tape Yarn เป็นการผลิตแบบผสม คือ การทำเส้นเทปนั้นเป็นการ Extrusion แต่หลังจากได้เส้นเทปแล้วต้องนำไปผ่านการทอ, การตัด และการเย็บ จึงจะออกมาเป็น กระสอบ พลาสติก

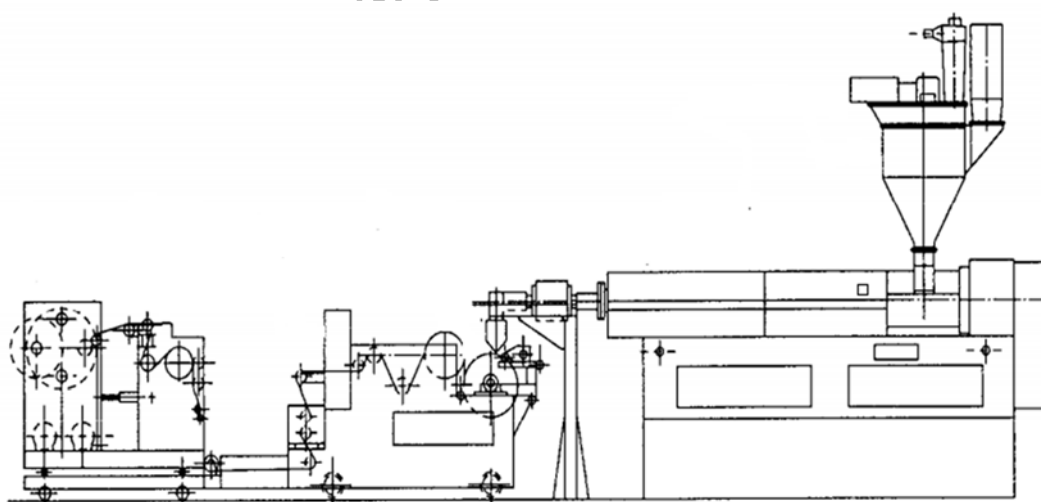


แผนภูมิที่ 2.6 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion)

การใช้พลังงานที่เครื่องอัดรีด (Extruder) ดังในภาพที่ 2.27 เครื่องอัดรีดของกระบวนการผลิตอัดขึ้นรูป (Extrusion) ทั้ง 6 แบบ จะคล้ายกัน จะแตกต่างกันที่รูปแบบของหัวใด ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์เช่น ถ้ากระบวนการ Pipe/Tube Extrusion หัวใดจะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่หน้าตัดเป็นท่อ หรือถ้าใช้กระบวนการอัดรีดแผ่น (Sheet Extrusion) หัวใดจะมีหน้ากว้างซึ่งเมื่อพลาสติกเหลวไหลผ่านออกมาจะมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นต้นส่วนขั้นตอนการผลิตอื่นๆ เช่น การหล่อเย็นการดึงหรือลาก และการตัดหรือม้วน ก็เหมือนกัน หากจะพิจารณาการใช้พลังงานแล้วค่อนข้างใกล้เคียงกัน สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันได้



ภาพที่ 2.27 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Blown Film

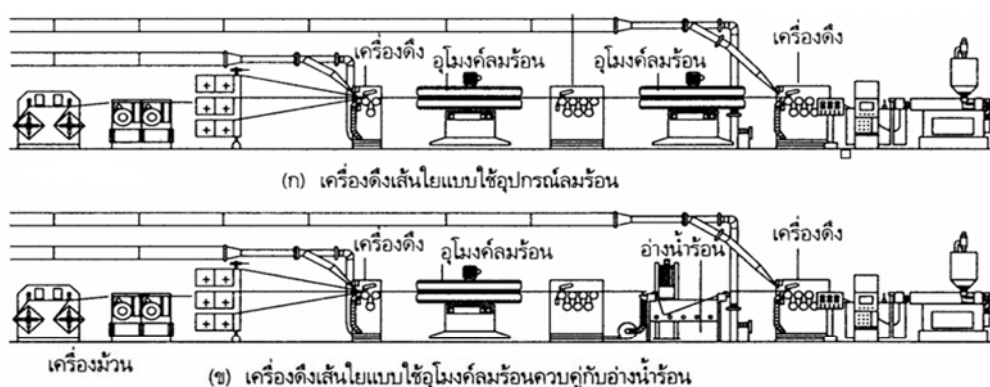


ภาพที่ 2.28 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Sheet/Film

Extrusion

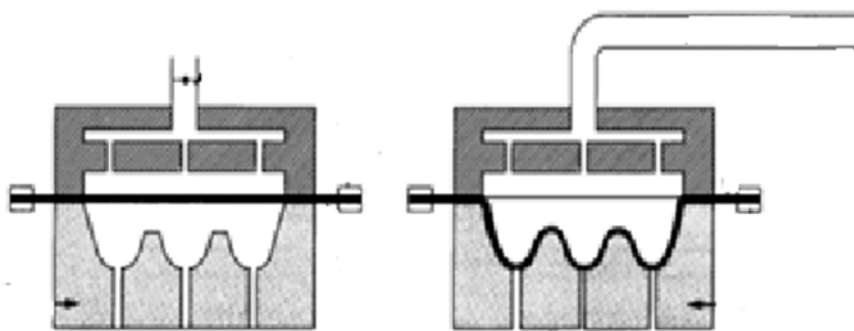


ภาพที่ 2.29 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Pipe/Tube/Profile Extrusion

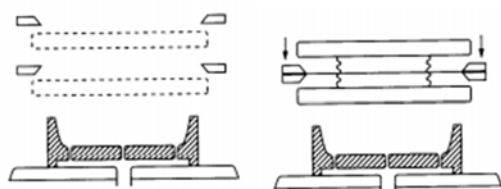


ภาพที่ 2.30 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Tape Yarn/Filament

2.10.9 การอัดขึ้นรูปพลาสติก(Thermoforming)และการเคลือบ(Laminating)เป็นกระบวนการที่ต่อจากการอัดรีดแผ่นSheet/Film Extrusion ซึ่งก็คือ วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการSheet/Film Extrusion เป็นลักษณะSecondary Process การ Thermoforming เป็นการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนกับแผ่นฟิล์ม หรือ แผ่นพลาสติกจนถึงอุณหภูมิอ่อนตัว แล้วใช้แรงบังคับให้แนบกับแม่พิมพ์ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นการใช้แรงดูดของสุญญากาศ (Vacuum Forming) หรือใช้ลมอัด (Blow Forming) หลังจากนั้นต้องทำให้เย็น เพื่อขึ้นงานคงรูปไว้ตามแบบของแม่พิมพ์ถูกคำนวณจากการวัดค่าความลึกที่หัวกดจมลงไปหรือขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้น โดยในทุกประเภทของความแข็งนั้น ค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุที่ความแข็งเพิ่มขึ้น ในการรายงานผล

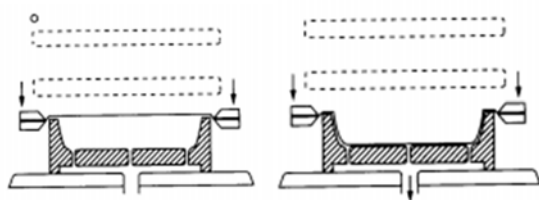


ภาพที่ 2.31 การขึ้นรูปแบบใช้ลมอัด (Blow Forming)



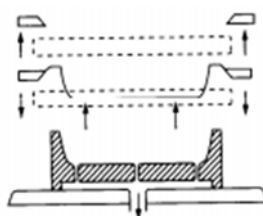
1. นำแม่พิมพ์ตัวเมียวางบนแท่น
กรอบยึดแผ่นพลาสติกเปิด Heater

2. ยึดแผ่นพลาสติกด้วยกรอบ
Heater ให้ความร้อน



3. เบี่ยง Heater ออก เลื่อนกรอบยึด
แผ่นพลาสติก ลงให้แนบสนิทกับแม่พิมพ์

4. ดูดสุญญากาศให้แนบกับ
แม่พิมพ์ ทำความเย็นชิ้นงาน



5. นำชิ้นงานออก ครอบวัตถุจักรงาน อุปกรณ์พร้อมทำงานชิ้นต่อไป

ภาพที่ 2.32 การขึ้นรูปแบบใช้แรงดูดสุญญากาศ (Vacuum Forming)

2.10.10 กระบวนการอัดขึ้นรูปนี้คือการทำให้ความร้อนแก่แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ที่ได้จากกล่องนมเมื่อผ่านการแยกออกจากกระดาดของกล่องนม การอัดร้อนนี้จะใช้อุณหภูมิ 180 –200 °C ใช้เวลาในการทำครั้งนี้ 25-30 นาทีต่อแผ่น เพื่อให้อลูมิเนียมฟอยล์หลอมเหลวแล้วเนื้อของอลูมิเนียมฟอยล์ติดกันจนเป็นแผ่น จากนั้นปล่อยไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้องกระบวนการแปรรูปพลาสติกด้วยกระบวนการกดอัดหรือการอัดแบบชนิดแรงอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่งโดยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกหลังจากBakelandค้นพบการสังเคราะห์ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินในปีค.ศ. 1908 แต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยาง (Rubbers และ Elastomers) และพลาสติกประเภทเทอร์มอเซต (Thermosets) เช่นฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) และยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea Formaldehyde) เป็นต้นนอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastics) ที่แปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยากเช่นการแปรรูปเทอร์มอพลาสติกคอมโพสิตที่มีการผสมไฟเบอร์ต่างๆการแปรรูปเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และการแปรรูปพลาสติกไวนิลและสไตรีนสำหรับทาแผ่นเสียงที่ต้องการความละเอียดแน่นอนเป็นต้นสำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกดอัดได้แก่ช้อนชามจานที่เขียนหรือลวดลายไฟกล่องบรรจุสวิตช์หม้อหุงกระทะมือจับเตารีดแผ่นเสียงตัวกวนของเครื่องซักผ้าและที่รองนั่งโถชักโครก เป็นต้น



ภาพที่ 2.33 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

2.11 การทดสอบทางกล

2.11.1 การทดสอบหาค่าความแข็ง(Hardness)[http://e-book.ram.\[25\]](http://e-book.ram.[25])มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช้ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (Relative Term) ค่าความแข็งที่กล่าวถึงนี้ จะแตกต่างไปจากค่าความต้านทานการขัดสี(Abrasion Resistance) หรือค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) ของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีนจัดเป็นวัสดุที่มี

ความแข็ง (Hardness) สูง แต่ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานการขีดสีต่อการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือ การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลตและไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่นยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีนความแข็งหมายถึงความต้านทานของวัสดุต่อการเกิดรอยกดอย่างถาวร นอกจากนี้ยังสำคัญที่จะต้องเข้าใจว่าความแข็งนั้นเป็นการทดสอบเชิงประจักษ์ ดังนั้นค่าที่ได้จะไม่ใช้สมบัติของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากจะมีการทดสอบหลากหลายประเภทให้ใช้งานและแต่ละประเภทจะให้ค่าความแข็งที่ต่างกันออกไปถึงแม้จะทดสอบด้วยวัสดุเดียวกัน ดังนั้นความแข็งจึงขึ้นกับวิธีทดสอบและผลการทดสอบที่ได้ทุกค่าจะมีคำอธิบายประกอบถึงวิธีการทดสอบที่ใช้กันอย่างใดก็ตามการทดสอบความแข็งยังคงได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์สมบัติวัสดุและประเมินว่าวัสดุมีความเหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่ การทดสอบความแข็งทุกประเภทที่อธิบายในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการใช้หัวกดที่มีรูปทรงเฉพาะซึ่งมีความแข็งมากกว่าตัวอย่างทดสอบกดลงไปในพื้นที่ผิวของตัวอย่างโดยใช้ค่าแรงที่กำหนด จากนั้นความลึกหรือขนาดของรอยกดดังกล่าวจะถูกวัดค่าเพื่อคำนวณค่าความแข็งประเภทของความแข็งความแข็งมีด้วยกัน 5 ประเภทหลัก ได้แก่บริเนลล์-HB, นูฟ - HK, ร็อกเวลล์-HR, ชอร์- HS, วิกเกอร์ส-HV แต่ละประเภทของความแข็งนั้นจะเป็นการใช้หัวกดที่มีรูปทรงเฉพาะซึ่งผลิตจากเพชร, คาร์ไบด์ หรือเหล็กชุบแข็ง กดลงไปยังวัสดุด้วยแรงและขั้นตอนที่กำหนด ค่าความแข็งจะถูกคำนวณจากการวัดค่าความลึกที่หัวกดจมลงไปหรือขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้น โดยในทุกประเภทของความแข็งนั้น ค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุที่ความแข็งเพิ่มขึ้น ในการรายงานผลการทดสอบความแข็งนั้นจะมีสัญลักษณ์ที่กำหนด เช่น HR, HV, HK เป็นต้น เพื่อแสดงถึงประเภทการทดสอบความแข็งที่ใช้งาน

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชร และใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอน

การทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่ เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore Scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell Superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบ โลหะที่มีความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็งนอกจากนั้นในการทดสอบความแข็งบางครั้งต้องทำการทดสอบกับ

วัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Tester) เช่น นูฟ (Knoop) เป็นต้น

แฟกเตอร์ 5 ข้อต่อไปนี้จะใช้เพื่อประเมินการเลือกใช้อุปกรณ์ทดสอบความแข็งที่เหมาะสมกับการใช้งานของท่าน

1. วัสดุ ขนาดเกรน, โลหะ, ยาง เป็นต้น
2. ค่าความแข็งโดยประมาณ เหล็กชุบแข็ง, ยาง เป็นต้น
3. รูปทรง ความหนาขนาด เป็นต้น
4. การปรับสภาพทางความร้อน ชุบผิวแข็งอบอ่อน เป็นต้น
5. ความต้องการของกระบวนการผลิต สุ่มตัวอย่าง หรือ 100%

2.11.1.1 การทดสอบความแข็ง Rockwell การทดสอบนี้เป็นแบบเดียวกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งหาได้จากขนาดความลึกรอยกดบนชิ้นทดสอบที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดภายใต้น้ำหนักคงที่ แต่ที่ต่างกันคือในทางปฏิบัติการทดสอบ Rockwell จะทดสอบด้วยน้ำหนักต่างกันสามชุดกับหัวกดสามขนาด ส่วนการทดสอบ Brinell จะมีขนาดหัวกดที่ต่างไปและใช้น้ำหนักกดที่มากกว่ารวมทั้งการทดสอบแบบ Rockwell จะมีรอยกดที่ได้มีขนาดเล็กและตื้นกว่า ส่วนวัสดุที่นำมาทดสอบสามารถใช้กับวัสดุกลุ่มเดียวกันกับการทดสอบ Brinell แต่สามารถทำการทดสอบได้เร็วกว่าเนื่องการทดสอบแบบ Rockwell สามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าปัดเครื่องตามมาตรฐาน ASTM E 18 ดังแสดงในภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.34 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell พร้อมหัวกด

การทดสอบแบบ Rockwell จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยการใส่น้ำหนักที่กระทำผ่านระบบดัมน้ำหนักกับระบบคาน หัวกดอาจเป็นลูกบอลเหล็กกล้าแข็ง 1/16 in. 1/8 in. ดังภาพที่ 2.34 หรือหัวกดเพชรรูปกรวยมุม 120° เรียกว่า Bral ดังภาพที่ 2.34 ค่าความแข็งที่แสดงบนหน้าปัดเครื่องเป็นส่วนกลับของค่าความลึกรอยกด ส่วนการแสดงผลหน่วยค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนัก ชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบยกตัวอย่างเช่นถ้าเลือกใช้น้ำหนักกด 100 kg. และใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าแข็งขนาด 1/16 in. ต้องอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องในสเกล B และถ้าใช้หัวกดเพชรกับน้ำหนักกด 150 kg. ต้องอ่านค่าความแข็งในสเกล C เป็นต้นในการทดสอบเริ่มแรกจะใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kg. ค้างไว้ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดเบื้องต้นบนชิ้นทดสอบ โดยสังเกตเข็มบนหน้าปัดเครื่องที่แสดงน้ำหนักกดเบื้องต้นจะเข้าสู่บริเวณที่กำหนดจากนั้นให้น้ำหนักกดแท้จริงโดยปกติถ้าใช้หัวกดบอลน้ำหนักกดแท้จริงจะอยู่ในช่วงประมาณ 60 ถึง 100 kg. และถ้าใช้หัวกดเพชรจะใช้น้ำหนักกดแทนจริงได้ถึง 150 kg. ส่วนหัวกดบอลจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 in. และหัวกดบอลขนาด 1/8 1/4 และ 1/2 in. จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า หลังจากใส่น้ำหนักกดแท้จริงและนำน้ำหนักกดออกให้อ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องโดยที่น้ำหนักกดเบื้องต้นยังค้างอยู่ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างสเกล ชนิดหัวกดและน้ำหนักกดของการทดสอบความแข็ง Rockwell

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002} \dots \dots \dots (2.12)$$

ตารางที่ 2.2 สเกลการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell

สเกล	หัวกด	น้ำหนัก (Kg.)
A	เพชร	60
B	บอล 1/16 นิ้ว	100
C	เพชร	150
D	เพชร	100
E	บอล 1/8 นิ้ว	100
F	บอล 1/16 นิ้ว	60
G	บอล 1/16 นิ้ว	150

ที่มา: <http://e-book.ram.edu> [26]

ตารางที่ 2.3 วิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ

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://www.seem.kmutt.ac.th> [27]

ในการทดสอบความแข็ง Rockwell ค่าความแข็งที่ได้สามารถมีได้หลายค่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดหัวกดและน้ำหนักกดที่ใช้ นอกจากนี้หน้าปัดเครื่องยังมีสองชุดคือสีแดงกับสีดำ ซึ่งรวมกันแล้วทำให้การทดสอบแบบ Rockwell มีหน่วยต่างกันประมาณ 30 หน่วย บนหน้าปัดจะออกแบบเป็นสเกล B และ C โดยสองสเกลนี้เป็นสเกลชุดแรกที่ผ่านรับรองมาตรฐานและนิยมใช้มากที่สุด ส่วนหน้าปัดสีแดงให้อ่านค่าความแข็งสำหรับสเกลที่ใช้หัวกดเป็นหัวบอลและหน้าปัดสีดำให้อ่านค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยหัวกดเพชรสเกล Rockwell อยู่ในรูปของเศษส่วน 100 และแต่ละส่วนหรือแต่ละค่าความแข็งมีค่าความลึกรอยกดเท่ากับ 0.002 mm. ถ้าอ่านค่าความแข็งได้เป็น 53 HRB กับ 56 HRB หมายถึงทั้งสองมีรอยกดต่างกันเท่ากับ 3×0.002 mm. นั่นคือ 0.006 mm. แต่เนื่องจากสเกลเป็นแบบกลับส่วนดังนั้นวัสดุที่อ่านค่าความแข็งได้สูงกว่าจึงเป็นวัสดุที่แข็งกว่าสเกล B ใช้ในการทดสอบวัสดุความแข็งปานกลางในช่วง 0 – 100 HRB ถ้าใช้หัวกดบอลวัดค่าความแข็งของวัสดุเกิน 100 HRB อาจทำให้หัวกดเกิดการยุบตัวทำให้ได้ค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนได้ส่วนสเกล C มักใช้ทดสอบกับวัสดุที่มีค่าความแข็งมากกว่า 100 HRB ซึ่งปกติแล้วเหล็กกล้าจะมีความความแข็งสูงสุดประมาณ 70 HRC และการวัดความแข็งด้วยสเกล C จะอยู่ที่ประมาณ 20 HRC ขึ้นไป เนื่องจากการทดสอบความแข็งต่ำกว่า 20 HRC ได้รอยกดที่เล็กมากทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่น่าเชื่อถือในการทดสอบให้เลือกใช้สเกลที่ใช้หัวกดบอลที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ทั้งนี้เพราะความว่องไวในการตรวจวัดจะลดลงตามขนาดรอยกดที่เพิ่มขึ้น ขึ้นทดสอบควรมีลักษณะแบนเรียบและปราศจากสนิม ออกไซด์ และควรเป็นวัสดุที่ไม่ผ่านการขึ้นรูปทั้งด้านบนและล่าง

ส่วนความหนาของชั้นทดสอบควรจะหนาพอที่จะไม่เกิดการบิดงอหรือเกิดการเสียรูปของแท่นรองรับ ชั้นทดสอบภายใต้การทดสอบเนื่องจากการเสียรูปดังกล่าวอาจทำให้การวัดค่าความแข็งคลาดเคลื่อนได้ในการทดสอบควรวัดกับวัสดุความหนาเดียวเสมอและเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากสิ่งเจือปน รู้อากาศเล็กๆและความบกพร่องที่ผิวอื่นๆ ควรทำการทดสอบอย่างน้อยสามจุดแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยการทดสอบสามารถแปลงค่าความแข็ง Rockwell เป็น Brinell ได้โดยความแข็ง Rockwell C ในช่วง 20 ถึง 40 สามารถแปลงเป็นค่าความแข็ง Brinell ได้ดังสมการ

$$BHN = \frac{1.42 \times 10^6}{(100 - HR_c)^2} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

สำหรับค่าความแข็ง HRC มากกว่า 40 ให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$BHN = \frac{2.5 \times 10^4}{100 - HR_c} \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

สำหรับค่าความแข็ง HRB ในช่วง 35 ถึง 100 ให้ใช้สมการต่อไปนี้

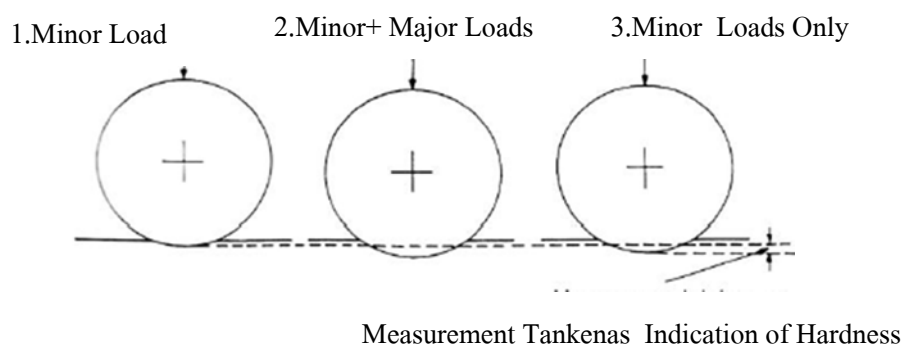
$$BHN = \frac{7.3 \times 10^3}{130 - HR_B} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\frac{2L}{\pi D(D - D^2 - d^2)} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

2.11.1.2 การทดสอบแบบ Rockwell Superficial บางการทดสอบเจาะจง

การทดสอบความแข็งเป็นแบบ Rockwell Superficial โดยการทดสอบนี้เป็นการทดสอบความแข็งที่บริเวณพื้นผิวซึ่งจะเกิดเป็นรอยกดตื้นๆ การทดสอบแบบนี้จะมีหลักการทำงานแบบเดียวกันกับแบบ Rockwell เพียงแต่ใช้น้ำหนักกดเบื้องต้นและน้ำหนักกดแท้จริงน้อยกว่า กล่าวคือใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 3 kg. และน้ำหนักกดแท้จริง 15 -30 หรือ 45 kg. โดยแต่ละค่าความแข็งที่วัดได้ความลึกเท่ากับ 0.001 mm. และใช้หัวกดชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบ Rockwell ในการทดสอบความแข็งแบบนี้จะใช้สเกล N และ T ส่วนสเกล W X และ Y จะใช้กับวัสดุที่อ่อนมากๆ ได้แก่ 15T 30T 45T หรือ 15N 30N และ 45N ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหัวกดและน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ กล่าวคือสเกล T จะใช้น้ำหนักตามตัวเลขในสเกลกับหัวกดบอลขนาด 1/16in. ในขณะที่สเกล N จะใช้น้ำหนักตามตัวเลขในสเกลเช่นกันแต่จะใช้หัวกดเป็นหัวกดเพชรรูปกรวย

การทดสอบแบบ Rockwell หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือการวัดความลึกของลูกบอลเหล็กที่ใช้เป็นตัวกดวัด (Indenter) โดยในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนหลักคือเริ่มจากการวางน้ำหนักรอง (Minor Load) ประมาณ 10 kg.ลงบนลูกบอลเหล็ก เพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบจากนั้นจึงทำการตั้งศูนย์(Set Zero) (ภายในเวลา 10 วินาทีมิฉะนั้นค่าอาจจะเปลี่ยนแปลงไปอีกเนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของพอลิเมอร์



ภาพที่ 2.35 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง Hardness แบบ Rockwell



ภาพที่ 2.36 Rockwell Hardness Tester

หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major Load) ให้กับลูกบอลเหล็กเป็นเวลานาน 15 นาที จากนั้นจึงยกน้ำหนักกดออกปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) ต่อไปอีกประมาณ 15 วินาทีแล้วจึงอ่านค่าความแข็ง (Hardness) จากสเกลของเครื่องวัดโดยจะมีหน่วยกำกับเป็น สัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลขขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กด

ตารางที่ 2.4 ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ

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

ที่มา : <http://www.seem.kmutt.ac.th>[28]

โดยสเกล R และ L จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ต่ำ ส่วนสเกล M และ E จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง (Hardness) สูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้นถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 HRC จะถือว่าความไว (Sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไปและต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

การทดสอบแบบ Rockwell มีข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดในการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell ผลที่ได้ค่อนข้างถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งการทดสอบทำได้รวดเร็วและได้ค่าความแข็งทันทีหลังการทดสอบโดยอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัดเครื่องโดยไม่ต้องทำการคำนวณใดๆ การทดสอบ Rockwell นี้เป็นการทดสอบความแข็งที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปเช่นเดียวกับ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบนี้ผลการทดสอบที่ได้จากวัสดุเดียวกันสามารถให้ค่าซ้ำๆ กันแม้ว่าจะทดสอบด้วยผู้ใดก็ตามและการทดสอบแบบนี้สามารถทำการทดสอบความแข็งกับวัสดุได้อย่างกว้างขวางข้อเสียของการทดสอบ Rockwell เป็นแบบเดียวกันกับการทดสอบ Brinell คือเครื่องทดสอบราคาค่อนข้างสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นการทดสอบแบบทำลาย

2.11.1.3 การทดสอบแบบ Brinell การทดสอบความแข็งหนึ่งที่ถูกใช้อย่างยาวนานที่สุดคือการทดสอบแบบ Brinell ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักกดที่ในการกดหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบโดยปกติจะใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทั้งสแตนเลสไปดัดขนาด 10 mm. กดลงบนผิวชิ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3,000 kg. สำหรับโลหะแข็ง 1,500 kg. สำหรับโลหะที่มีความแข็งปานกลางและ 500 kg. หรือต่ำกว่านั้นสำหรับวัสดุอ่อนนุ่มเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell มีหลายแบบซึ่งแตกต่างกันในหัวข้อต่อไปนี้เป็นต้น

1. กรรมวิธีการใส่น้ำหนักกดเช่นใช้แรงดันน้ำมันระบบเฟืองหรือระบบคาน เป็นต้น
2. กรรมวิธีการดำเนินการทดสอบเช่นใช้มือหรือแรงขับเคลื่อน

3. กรรมวิธีวัดน้ำหนักกดเช่น Piston กับน้ำหนัก มาตรวัด Bourdon ,
Dynamometer หรือระบบคัน

4. ขนาดคือเล็กแบบตั้งโต๊ะหรือใหญ่แบบประจำที่ดังภาพที่ 2.37 การทดสอบ
ความแข็งแบบ Brinellสามารถใช้เครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยใช้อุปกรณ์ช่วยยึดหัวคลูกบอลแล้ว
นำแผ่นโลหะที่ต้องการทดสอบยึดเข้าอุปกรณ์แขนจับยึดชิ้นงานโดยใช้หัวคบอลขนาด
3/64 in.และสปริง 22 ปอนด์



ภาพที่ 2.37 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell

การทำการทดสอบความแข็งแบบ Brinellให้นำชิ้นทดสอบไปวางบนแท่นวางชิ้นทดสอบ
แล้วยกระดับแท่นวางขึ้นจนชิ้นทดสอบสัมผัสหัวคจากนั้นใส่น้ำหนักกดโดยการบีมน้ำมันเข้าไป
ในทรงกระบอกหลัก ซึ่งเลื่อน Piston หลักลงและกดหัวคบอลเข้าไปในชิ้นทดสอบ ซึ่งเนื้อชิ้น
ทดสอบจะยึดพื้นผิวหัวคไว้ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานเล็กน้อยโดยจะใช้
มาตรวัด Bourdon ในการแสดงน้ำหนักกดอย่างหายาบ เมื่อใส่น้ำหนักตามที่ต้องการตาชั่งน้ำหนัก
ด้านบนของเครื่องจะยกตัวขึ้นโดยการกระทำของ Small Piston โดยต้องระวังอย่าให้มน้ำหนักเกิด
กับหัวคมากจนเกินไปการทดสอบตามมาตรฐานการวัดขนาดของรอยกดจะใช้เครื่องวัด
ไมโครมิเตอร์ผ่านกล้องจุลภาค หรือกล้องจุลภาค Brinellซึ่งจะมีมาตรวัดโปร่งแสงปรากฏอยู่บน
ภาพรอยกดBrinellเป็นการทดสอบความแข็งที่ดีแต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุที่แข็ง
มากเนื่องจากหัวคลูกบอลจะเกิดการเสีรูปรวมเกินไป รวมทั้งการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมาก
เนื่องจากรอยกดที่เกิดขึ้นอาจเกินความหนาชิ้นทดสอบ และไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่ผ่าน
การชุบผิวแข็งเนื่องจากรอยกดจะลึกเกินความหนาของชั้นชุบแข็ง ทำให้ได้ค่าความแข็งของ
แกนกลางชิ้นทดสอบซึ่งอ่อนนุ่มร่วมด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวชุบผิดพลาดและตาม ค่าความ
แข็ง Brinellปกติวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรของรอยกดที่

เกิดขึ้นหลังนำน้ำหนักกดออกโดยการหารแรงที่กระทำด้วยพื้นที่รอยกดในรูปของพื้นที่ทรงกลม ดังภาพที่ 2.38 โดยนำค่าแรงที่กระทำและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดแทนลงในสูตร

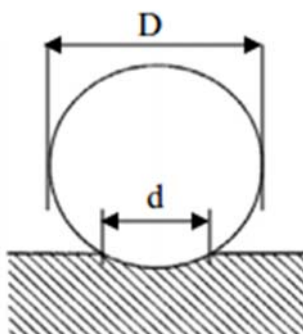
$$BHN = \frac{2L}{\pi D(D^2 - d^2)} \dots\dots\dots(2.17)$$

เมื่อ BHN คือค่าความแข็ง Brinell (kg/mm^2)

L คือน้ำหนักกดที่กระทำ (kg.)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm.)

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm.)



ภาพที่ 2.38 หัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็ง Brinell

ค่าความแข็ง Brinellปกติอยู่ในช่วง 90 ถึง 630 ค่าที่สูงขึ้นหมายถึงความแข็งที่มากขึ้น รอยกดที่ลึกจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดมากแต่มีค่าความแข็งนี้อยู่ในกรณีที่ใช้หัวกดลูกบอล ขนาด 10 mm. ถ้ารอยกดที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า 6 mm. ควรปรับลดน้ำหนักกดลงขณะที่หัวกดเคลื่อน สูงพื้นผิวของวัสดุเนื้อวัสดุรอบหัวกดจะแข็งขึ้นและเนื้อวัสดุส่วนนี้จะทำให้การอ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดผิดพลาดค่าความแข็งที่วัดได้ในช่วงปลายของมาตราวัด เช่นความแข็งเกิน 650 BHN ไม่ควรเชื่อถือมากนักเนื่องด้วยสองเหตุผล ประการแรกเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดนี้อยู่ เกินไปทำให้การอ่านค่าไม่แม่นยำ ประการที่สองถ้าวัสดุแข็งมากหัวกดบอลจะยุบตัวทำให้แบน เรียบและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดที่ใหญ่ขึ้นทำให้ค่าความแข็งที่คำนวณได้เชื่อถือไม่ได้ และปกติมีวัสดุไม่มากนักที่มีค่าความแข็งเกิน 650 BHN โดยทั่วไปวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 150 BHN หรือมากกว่านั้นจะใช้น้ำหนักกด 3000 kg. ส่วนน้ำหนักกด 1500 kg. จะใช้กับวัสดุที่มีความแข็ง 75 ถึง 300 BHN และ 500 kg. ใช้กับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า 100 BHN ในบริเวณที่คาบเกี่ยวกันให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมและขั้นตอนทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกดถ้าทำการทดสอบกับชิ้นงานที่บางกว่านี้ความแข็งของแท่นวางอาจส่งผลกระทบต่อ

ต่อค่าความแข็งของวัสดุได้การทดสอบความแข็งแบบ Brinellมีข้อจำกัดและข้อเสีย คือเป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งจะมีรอยกดปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุหลังการทดสอบ ดังนั้นวัสดุที่ผ่านการทดสอบจะไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้ อีก นอกจากนั้นเครื่องทดสอบความแข็ง Brinellมีน้ำหนักมากประมาณ 200 ปอนด์ จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมทั้งราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบความแข็งแบบอื่น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับวิธีการฝึกสอนประสบการณ์และทัศนคติของผู้ทดสอบในการวัดรอยกด ซึ่งอาจทำให้การอ่านค่ารอยกดได้แตกต่างกัน แต่ปกติแล้วความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะมีน้อยคือคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบ Brinellคือเป็นวิธีการทดสอบที่เก่าแก่จนเป็นที่ยอมรับและเป็นที่คุ้นเคยของคนส่วนใหญ่ ตลอดจนผลการทดสอบความแข็งที่ได้รับยังเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม รวมทั้งการทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็วคือประมาณ 2 นาทีในการดำเนินการทดสอบนอกจากต้นทุนค่าเครื่องมือแล้วต้นทุนอื่น

2.11.1.4 การทดสอบแบบ Vickers การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีมุมของปลายแหลม 136° ดังภาพที่ 2.45 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120kg. โดยจะเพิ่มครั้งละ 5kg. การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinellคือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกดและจากภาพที่ 2.39สามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ

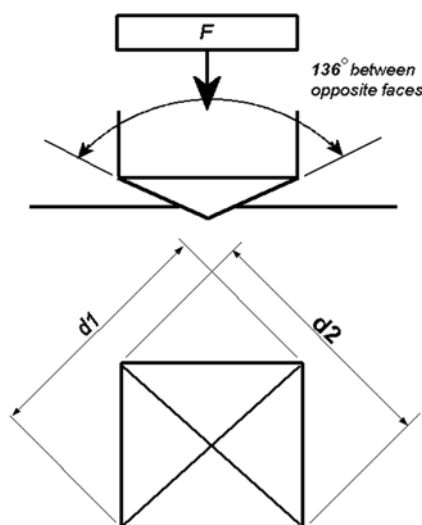
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136/2)} \text{ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} \frac{d^2}{1.8544} \dots\dots\dots(2.18)$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

$$\text{จากความแข็ง Vickers} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่รอยกด}} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\text{จะได้DPH} = \frac{1.8544 F}{d^2} \dots\dots\dots(2.20)$$

เมื่อDPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm^2) F คือน้ำหนักกด (kg.) และ d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm.)



ภาพที่ 2.39 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers

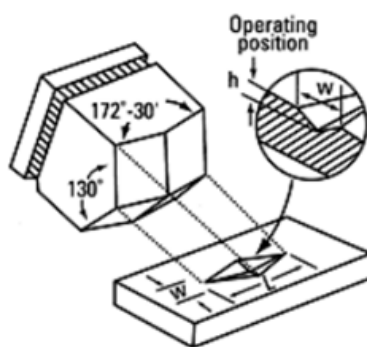
ในการทดสอบนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวกด จากนั้นให้ปลดล็อกระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่างต่อเนื่อง จากนั้นน้ำหนักกดออกสลับระดับแท่นวางลง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏ การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขึ้นต้นจะใช้ในงานวิจัยข้อดีของการทดสอบนี้คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้คือหนาประมาณ 0.006in. นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1,300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบและค่าความแข็งที่ยอมรับมากกว่าข้อเสียคือเป็นการทดสอบแบบทำลายขั้นตอนการทดสอบใช้เวลามากกว่าการทดสอบแบบ Brinell และ Rockwell ชิ้นทดสอบต้องทำการขัดเงาซึ่งใช้เวลามากนอกจากนั้นเครื่องทดสอบมีราคาแพง

2.11.1.5 การทดสอบความแข็งแบบ Knoop การทดสอบความแข็งแบบ Knoop เป็นการวัดความต้านทานของพื้นที่วัสดุต่อการเกิดรอยกดหรือต่อการเสียรูปถาวรที่พื้นผิวของวัสดุแบบเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Vickers ต่างกันที่หัวกดแบบ Knoop จะเป็นหัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยมีเส้นทแยงมุมด้านยาวกับด้านสั้นต่างกันเป็นอัตราส่วน 7 : 1 ดังภาพที่ 2.40 และใช้น้ำหนักกดในช่วง 25-3,600g. การทดสอบความแข็ง Knoop ใช้ประโยชน์ในการทดสอบความแข็งกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือทดสอบในบริเวณพื้นที่เล็กๆ บนชิ้นทดสอบ โดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 60-1,000 ในการทดสอบให้นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นปรับให้ได้ระยะโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์แล้วเลื่อนแท่นทดสอบเพื่อหาตำแหน่งที่จะ

ทดสอบบนชิ้นงาน จากนั้นปล่อยน้ำหนักกดแบบเดียวกับเครื่อง Vickers เสร็จแล้วทำการวัดระยะเส้นทแยงมุมของรอยกดด้านยาวนำไปคำนวณหาค่าความแข็งดังสมการ

$$KHN = \frac{1.43 \times P}{L^2} \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ KHN คือค่าความแข็ง Knoop(kg/mm^2) P คือน้ำหนักกด (kg.) และ L คือความยาวเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกด (mm.)



ภาพที่ 2.40 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Knoop

2.11.1.6 การทดสอบความแข็งแบบ Durometerมีหลายชนิดการเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ โดยหลักการทำงานของเครื่องแต่ละแบบจะเหมือนกันต่างกันเฉพาะความคมของปลายแหลมของหัวกดและขนาดของน้ำหนักกดที่ได้จากแรงส่งของสปริงขนาดต่างๆ การวัดค่าความแข็งจะได้จากค่าความลึกของรอยกดโดยค่าความแข็งจะเริ่มจาก 100 ที่ความลึกรอยกดเท่ากับศูนย์จนถึงค่าความแข็งเท่ากับศูนย์ที่ความลึกรอยกด 0.1in. โดยน้ำหนักกดที่กระทำกับหัวกดจะแปรผกผันกับความลึกรอยกดกล่าวคือวัสดุแข็งที่ให้ความลึกรอยกดน้อยให้เลือกใช้Durometerที่มีน้ำหนักกดสูงๆ ส่วนวัสดุอ่อนที่ให้ความลึกรอยกดมากให้ใช้ชนิดที่มีน้ำหนักกดต่ำๆ ชิ้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 1/4in. และในการทดสอบให้เว้นระยะจากขอบชิ้นทดสอบอย่างน้อย 1/2in. ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วย Durometer ชนิดหนึ่งไม่สามารถใช้เปรียบเทียบหรือแปลงค่าไปเป็นค่าความแข็งของ Durometer อีกชนิดหนึ่งได้Durometerแบบ Shore เป็นเครื่องทดสอบด้วยมือซึ่งออกแบบให้ใช้ในการทดสอบความแข็งกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติกและวัสดุประกอบต่างๆ (Composites) ภาพที่ 2.41แสดงเครื่องทดสอบ Durometerแบบ Shore ซึ่งมีสองชนิดพื้นฐาน ได้แก่Shore A กับ D ทั้งสองชนิดนี้มีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกันคือสปริงจะส่งน้ำหนักไปยังหัวกดซึ่งจะกดลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวชิ้นทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัด

Durometer โดยแบบ A จะมีสปริงที่ให้น้ำหนักกดระหว่าง 56-822 g. ส่วนแบบ D น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 0-10lb ทั้งสองแบบนี้อ่านค่าความแข็งได้จาก 0-100 กล่าวคือวัสดุที่อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมากหรือมีความต้านทานต่อการเกิดรอยกดได้สูง ส่วนการแสดงผลจะขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้เช่น 50A หรือ A50 เป็นต้น รายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของหัวกด น้ำหนักกดที่ได้จากสปริง ลักษณะการใช้งานของสเกลต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.41 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240



ภาพที่ 2.41 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore

2.11.1.7 การทดสอบความแข็งแบบพลวัต (Dynamic) เครื่องทดสอบความแข็งแบบพลวัตส่วนใหญ่เป็นการทดสอบรอยกดโดยค่าความแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่ขึ้นทดสอบดูดซับไว้ขณะทดสอบ การทดสอบความแข็งแบบนี้เริ่มแรกโดย Rodman ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้หัวกดปิรามิดในปี 1861 และในช่วงหลังได้ใช้คอนปลายกลม โดยงานที่ได้จากปล่อยก้อนให้ระเหตกกับขึ้นทดสอบจะแปรผันตรงกับปริมาตรของรอยกดที่เกิดขึ้น กล่าวคือค่าความแข็งเท่ากับค่างานที่จำเป็นในการทำให้เกิดหนึ่งหน่วยปริมาตรของรอยกดกระบวนการทดสอบนี้สามารถใช้ประโยชน์ได้ดีในการทดสอบความแข็งวัสดุที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการทดสอบแบบนี้คอนหัวกดใช้เวลาสั้นช้าน้อยอยู่ในการสัมผัสกับขึ้นทดสอบทำให้คอนหัวกดได้รับผลกระทบจากความร้อนไม่มากเครื่องทดสอบดีกระแทกหลายชนิดที่ใช้ น้ำหนักแบบพลวัต เช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแบบพลวัต โดยค่าความแข็งจะคำนวณจากพลังงานสุทธิหารด้วยปริมาตรของรอยกดเครื่องทดสอบความแข็งแบบนี้ที่สำคัญอันหนึ่งคือเครื่อง Pellin ซึ่งจะทดสอบด้วยการปล่อยแท่งหัวกดที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนและมีปลายแท่งด้านล่างเป็นลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm. นอกจากนั้นยังมีเครื่องทดสอบความแข็งแบบนี้อีกหลายแบบ ได้แก่ Whitworth Autopunch ซึ่งเครื่องทดสอบจะเป็นแบบเดียวกับการทดสอบ Brinell โดยการทดสอบเป็นการปล่อยสปริงซึ่งจะให้พลังงานตามมาตรฐานการหดตัวกับหัวกดรูปบอลที่ติดอยู่ปลายด้านล่างของแท่งหัวกดจากนั้นหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดไปคำนวณหาความแข็งแบบเดียวกันกับ Brinell เครื่องทดสอบแบบ Waldo จะใช้หัวกดเหล็กกล้าหนัก 0.1lb แล้วปล่อยลงมาที่

ความสูง 12in. และค่าความแข็งหาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด ส่วนเครื่องDuroscope จะวัดความแข็งจากการกระดอนของหัวกดลูกตุ้ม สุดท้ายเครื่องแบบ Avery เป็นการพัฒนาจากการทดสอบการกระแทกแบบ Izodในการหาค่าความแข็งแบบพลวัตปัจจุบันการทดสอบแบบพลวัตนี้ เครื่อง Shore Scleroscopeได้รับความนิยมมากที่สุด โดยในการทดสอบจะใช้Scleroscopeซึ่งเป็นแบบเดียวกับการทดสอบการกระดอน กล่าวคือการทดสอบจะวัดจากความสูงการกระดอนของลูกตุ้มขนาดเล็กที่ถูกปล่อยในกระบอกแก้วที่ความสูง 10 in. โดยลูกตุ้มมาตรฐานจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 in. ยาว 3/4 in.

2.11.1.8 การทดสอบความแข็งแบบ Scratch Hardness การทดสอบความแข็งลักษณะนี้ความแข็งที่ได้จะเป็นค่าความแข็งโดยประมาณซึ่งได้จากการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งในการขีดข่วนอีกวัสดุหนึ่งซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าให้เป็นรอย ดังนั้นความแข็งที่ได้จึงอยู่ในรูปของการเปรียบเทียบความแข็งระหว่างวัสดุต่างๆการทดสอบความแข็งในลักษณะนี้เป็นที่รู้จักในชื่อของสเกลมอร์(Mohs' Scale) ซึ่งจะใช้แร่ธาตุต่างๆ เป็นเครื่องมือวัดค่าความแข็งโดยแร่ธาตุแต่ละชนิดจะถูกกำหนดค่าความแข็งต่างกักันดังแสดงในตารางที่ 2.5 การหาค่าความแข็งของวัสดุต่างๆ ด้วยสเกลมอร์สามารถทำได้ด้วยการนำวัสดุนั้นมาทำการขีดข่วนด้วยแร่ธาตุต่างๆ ในตารางที่ 2.5 และค่าความแข็งที่ได้จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของแร่ธาตุ ที่วัสดุสามารถขีดข่วนและไม่สามารถขีดข่วนให้เป็นรอย

ตารางที่ 2.5 สเกลความแข็งของมอร์ (Mohs' Scale)

Mineral	Hardness Number
Talc	1
Gypsum	2
Calcite	3
Fluorite	4
Apatite	5
Feldspar	6
Quartz	7
Topaz	8
Corundum	9
Diamond	10

2.11.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (Modulus of Rupture (MOR))

[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream\[29\]](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream[29]) การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติกและมักใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเอียงศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องทดสอบเหมือนการทดสอบความต้านทานแรงดึงนอกจากนี้การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่เพียงแต่ในบริเวณที่จะเกิดการเสียหายอีกด้วยอย่างไรก็ตามสภาพของแรงดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นงานของการทดสอบสองประเภทนี้จะแตกต่างกันโดยในการทดสอบความต้านทานแรงดึงนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (Uniform Tension) แต่ในการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอชิ้นงานจะได้รับแรงดึงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด (Non-Uniform Tension) เนื่องจากในสภาวะที่ชิ้นงานถูกดัดงอนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงสูงสุดบนพื้นผิวหนึ่งและได้รับแรงอัดสูงสุดบนพื้นผิวด้านตรงข้ามยกตัวอย่างเช่นในกรณีของวัสดุเนื้อเดียวภายใต้แรงดัดงอล้วนๆ (Pure Bending) พื้นผิวด้านล่างจะอยู่ภายใต้แรงดึงในขณะที่พื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจะอยู่ภายใต้แรงอัดถ้าวัสดุนี้มีค่ามอดุลัสของแรงดึงและแรงอัดที่เท่ากันบริเวณแนวกึ่งกลางของความหนาชิ้นงานทดสอบจะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงของสภาพแรงดึงสู่แรงอัดและมีค่าแรงกระทำในบริเวณเท่ากับศูนย์

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะแต่ไม่เหมาะสำหรับพลาสติกอ่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มากเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุอยู่ในระดับต่ำวัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นและอยู่ภายใต้แรงดัดงอล้วนๆเท่านั้นดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่การทดสอบแบบ 3 จุด (Three-Pointed Bending) และการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending) หนาชิ้นงานทดสอบจะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงของสภาพแรงดึงสู่แรงอัดและมีค่าแรงกระทำในบริเวณเท่ากับศูนย์

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะแต่ไม่เหมาะสำหรับพลาสติกอ่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มากเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุอยู่ในระดับต่ำวัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นและอยู่ภายใต้แรงดัดงอล้วนๆเท่านั้นดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่การทดสอบแบบ 3 จุด (Three-Pointed Bending) และการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending)

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อ $\sigma_{\max}$ คือความเค้นสูงสุด มีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa)
 M คือโมเมนต์ดัด มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร N*m ได้จากสมการ

$$M = \frac{F_{\max} L}{4} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

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

L คือ ความยาวช่วงพาด มีหน่วย เป็นเมตร (m)

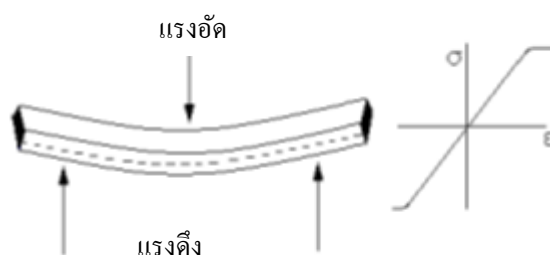
C คือ ระยะห่างมากที่สุดจากแกนสะเทินซึ่งมีค่า เป็นครึ่งหนึ่งของความหนา มีหน่วยเป็น เมตร (m.)

I คือโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) มีหน่วยเป็นเมตร (m^4)
 คำนวณจากสมการ

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m.)

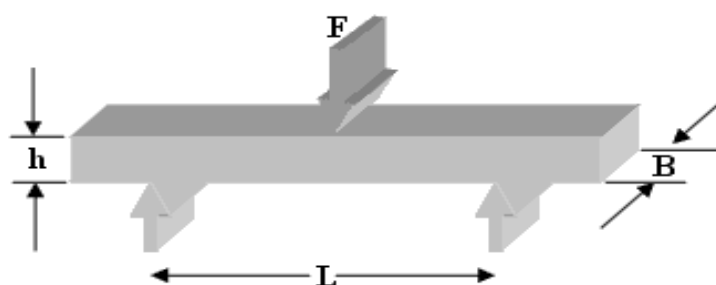
d คือ ความหนาชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m.)



ภาพที่ 2.42 หลักการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอการหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก

1) การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุดเป็นการทดสอบที่มีการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามที่บริเวณปลายทั้งสองด้านโดยมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากันเหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ได้ด้าหัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round Knife Edges) หรือ เพลาโลหะแข็งก็ได้รัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 mm. และมีรัศมี สูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกดและ 1.5 เท่าของความหนาชิ้น ทดสอบสำหรับชุดรองรับการที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าว เพื่อเป็นการลดความเข้มของความเค้น (Stress Concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้นนอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้ง สองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้น ทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



ภาพที่ 2.43 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

ที่มา :Strength of materials, Andrew Pyel, 1980, p.237 [30]

ตารางที่ 2.6 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$	$\sigma = \frac{8FL}{\pi D^2}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{6Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{6YD}{L^2}$
มอดุลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^3} \left(\frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{4L^3}{3\pi^4} \left(\frac{F}{Y} \right)$

ที่มา : การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก,จินตมัย สุวรรณประทีป, จัดพิมพ์โดย สมาคม ส่งเสริมเทคโนโลยี (ส.ส.ท.) 2547 [31]

โดยที่

F คือ แรงกระทำ

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (Span Length)

h คือ ความหนา

B คือ ความกว้าง

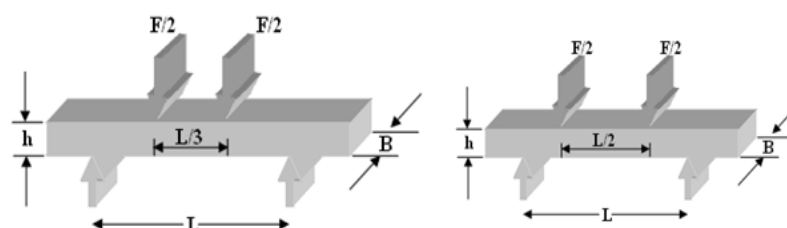
Y คือ ระยะการค้ำของชิ้นงาน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกดัน

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง F และ Y ในวงเล็บจะเท่ากับความชันในช่วงแรกของกราฟที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการค้ำของชิ้นงานในช่วงแรกที่กราฟยังเป็นเส้นตรง

2) การทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending) ใช้อุปกรณ์จันทันเพชร และนครเสกทองทอง[32] ได้กล่าวว่าการทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่ 2 จุด ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าในกรณีของการทดสอบการค้ำแบบ 3 จุด หัวกดที่ให้ภาระและจุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมนหรือเพลลา

โลหะแข็งเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ 3 จุด แต่รัศมีของหัวกดและชุดให้ภาระจะมีค่าเท่ากัน โดยจะต้องมีรัศมีอย่างน้อย 3.2 mm. และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 1.5 เท่าของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ระยะห่างระหว่างชุดกดและชุดรองรับในการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบ 1/3 และแบบ 1/4 การจัดระยะ 1/3 หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ-จุดกดและระหว่างจุดกดทั้งสองมีค่าเท่ากันคือ 1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่การจัดระยะแบบ 1/4 หมายถึงระยะห่างระหว่างจุดรองรับและจุดกดมีค่าเท่ากับ 1/4 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างจุดกดทั้งสองเท่ากับ 2/4 เท่าของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองหรือระยะสเปกสามารถกำหนดได้โดยจาก อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นงานทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16 : 1 ถึง 60 : 1



ภาพที่ 2.44 การทดสอบการค้ำแบบ 4 จุด

ที่มา: Strength of materials, Andrew Pyel, 1980, p.237 [33]

ตารางที่ 2.7 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงคังอแบบ 4 จุด

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม		ทรงกระบอก	
	1/3	1/4	1/3	1/4
	ของระยะสแปน	ของระยะสแปน	ของระยะสแปน	ของระยะสแปน
ความเค้น	$\sigma = \frac{FL}{Bh^2}$	$\sigma = \frac{3FL}{4Bh^2}$	$\sigma = \frac{16FL}{3\pi^3}$	$\sigma = \frac{4FL}{\pi D^3}$
ความเครียด	$\varepsilon = \frac{4.70Yh}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.36Yh}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.70YD}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.36YD}{L^2}$
มอดูลัส	$\varepsilon = \frac{0.2IL^3}{Bh^2} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\varepsilon = \frac{0.17L^3}{Bh^3} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\varepsilon = \frac{1.12L^3}{\pi D^4} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\varepsilon = \frac{0.91L^3}{\pi D^4} \left(\frac{F}{Y}\right)$

ที่มา : การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก,จินตมัย สุวรรณประทีป, จัดพิมพ์โดย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ส.ส.ท.) 2547[34]

โดยที่

- F คือ แรงกระทำ
- L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (Span Length)
- h คือ ความหนา
- B คือ ความกว้าง
- Y คือ ระยะการคังอของชิ้นงาน
- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกตัน

จินตมัย สุวรรณประทีป [35] ได้กล่าวว่าลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบการคังอทั้งแบบ 3 จุดและ 4 จุดนั้นจะอยู่ในลักษณะของคาน โดยอาจจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ในการเตรียมชิ้นงานนั้น ชิ้นงานที่ได้จะต้องมีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ พื้นผิวจะต้องมีความขนานและไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียม ชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้สำหรับวัสดุบางประเภท เช่นเซรามิก บริเวณขอบของชิ้นงานอาจจะมีกรทำให้มน โคนหรือปาดทำมุม (Chamfer) เพื่อลดความเข้มของความเค้นในบริเวณดังกล่าวชิ้นงานในการทดสอบแรงคังอจะไม่ถูกจับยึดแต่อย่างใด แต่จะถูกวางอยู่ตรงกลางบนแท่นรองรับระหว่างจะรับแรงสองจุด จากนั้นชิ้นงานจะถูกกดด้วยแท่นกดจากด้านบนซึ่งจะมีจำนวนจุดรองรับแรงกดขึ้น อยู่กับลักษณะของการทดสอบ โดยจุดรองรับในการส่งผ่านแรงกดชิ้นงานทุกจุดจะต้องมีความโค้งมนเพื่อลดความ เข้มความเค้นในบริเวณนั้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักในบริเวณจุดกดนั้นได้ นอกจากนี้จุดรับแรงกดทั้งหมดสามารถที่จะ

เป็นแบบยึดติดโดยไม่สามารถหมุนได้ หรืออาจจะมีลักษณะที่หมุนตัวได้บ้างเพื่อที่จะลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงาน ทดสอบและจุลกรองรับ ซึ่งจะมีผลต่อผลการทดสอบได้



ภาพที่ 2.45 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (MOR)

2.11.3 ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity (MOE))

<http://www.instron.co.th> [36] อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความเค้น แนวลาดของส่วนเส้นตรงของแผนผังความเครียดความเค้น โมดูลัสสัมพัทธ์ความยืดหยุ่นคือ แนวลาดของแผนผังความเครียดความเค้น ณ จุดใด ๆ โมดูลัสที่แทนที่ความยืดหยุ่นเป็นความเค้นที่หารด้วยความเครียดตามค่าความเค้นหรือความเครียดที่ระบุ สามารถเรียกอีกอย่างว่า อัตราส่วนความเค้นความเครียด โมดูลัสสัมพัทธ์และโมดูลัสที่แทนที่ความยืดหยุ่นจะเท่ากับ หรือสูงถึงพิสัยสัดส่วนของวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภท โหลดตามแผนผังความเครียดความเค้น โมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถรายงานผลเป็น

$$MOE = \frac{L^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3 (d_2 - d_1)} \dots\dots\dots (2.25)$$

เมื่อ MOE คือ โมดูลัสยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa)

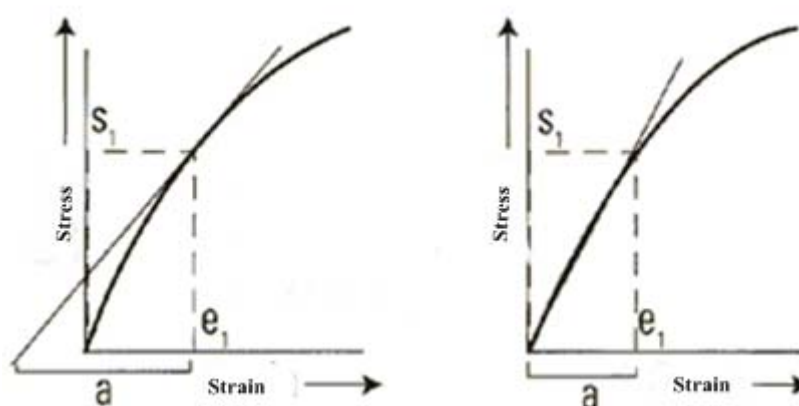
L คือ ความยาวช่วงพาด มีหน่วยเป็น เมตร (m.)

b คือ ความกว้างชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m.)

t คือ ความหนาชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m.)

$F_2 - F_1$ คือ น้ำหนักบรรทุก (Load) ที่เพิ่มขึ้นในกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งจากการทดสอบโดย F_{max} (EN 310 : 1993) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$d_2 - d_1$ คือ ระยะโก่ง (Deflection) ที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่ง กึ่งกลาง ชิ้นทดสอบที่ตรงกับน้ำหนักบรรทุก $F_2 - F_1$ มีหน่วยเป็น เมตร (m.)



ภาพที่ 2.46 โมดูลัสความยืดหยุ่น

โมดูลัสแรงอัดความยืดหยุ่น (หรือโมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงอัด) โมดูลัสความยืดหยุ่นในการดัดโค้ง) โมดูลัสเฉือนความยืดหยุ่น (หรือโมดูลัสความยืดหยุ่นจากแรงเฉือน) โมดูลัสแรงดึงความยืดหยุ่น (หรือโมดูลัสความยืดหยุ่นจากแรงดึง) หรือโมดูลัสแรงบิดความยืดหยุ่น (หรือโมดูลัสความยืดหยุ่นจากแรงบิด) สามารถระบุโมดูลัสความยืดหยุ่นได้จากการทดสอบเชิงพลวัตร โดยสามารถค่าจากคอมเพลกซ์โมดูลัส โมดูลัสเพียงอย่างเดียวใช้เพื่ออ้างถึงโมดูลัสแรงดึงความยืดหยุ่น โมดูลัสเฉือนโดยปกติเกือบจะเท่ากับโมดูลัสแรงบิด โดยทั้งสองสามารถเรียกเป็นโมดูลัสการคืนตัว โมดูลัสความยืดหยุ่นจากแรงบิดและแรงอัดโดยประมาณจะเท่ากัน และเรียกว่า โมดูลัสของยัง โมดูลัสการคืนตัวมีส่วนเกี่ยวข้องกับโมดูลัสของยังตามสมการต่อไปนี้

2.11.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength, IB) <http://www.instron.co.th>[37] แผ่นไม้อัด และ แผ่นไม้อัดพาร์ติเคิลเป็นวัสดุวิศวกรรมที่ผลิตโดยการยึดติดของเศษไม้หรือผงไม้เข้ากันด้วยกาวภายใต้แรงดันสูง ซึ่งจากปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของวัสดุเหล่านี้ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องมีการทดสอบที่เคร่งครัดเพื่อประมาณค่าความแข็งแรงหนึ่งในการทดสอบนี้ได้แก่การทดสอบแรงดึงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว หรือที่รู้จักกันว่าการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดภายใน (Internal Bond Strength Test) และมักถูกใช้เป็นการตรวจวัดพื้นฐานสำหรับประสิทธิภาพของกาวที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบของไม้ วิธีการทดสอบนี้จะรวมถึงการประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของบอร์ดเหล่านี้หรือการยึดเกาะของกาวในไม้โดยหลักการแล้ว การทดสอบเกี่ยวข้องกับการยึดติดก่อนวัสดุสำหรับจับยึดเข้ากับพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานทดสอบด้วยกาวที่เหมาะสม มาตรฐาน ASTM D 1037 Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials ระบุว่าพีซีเจอร์สำหรับการให้แรงต้านบนจะต้องสามารถจัดศูนย์ได้ด้วยตนเอง และก่อนวัสดุสำหรับการจับยึด

จะต้องเป็นเหล็กหรือโลหะผสมของอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดสองนิ้ว หนาหนึ่งนิ้ว ส่วนฟิกซ์เจอร์ที่จับยึดก่อนวัสดุนี้จะติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบและแรงดึงจะถูกส่งผ่านไปบนแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบจนกว่าจะเกิดการเสียหาย ความต้านทานแรงดึงจะถูกคำนวณจากค่าแรงสูงสุดที่จุดแตกหักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบตามมาตรฐานนี้มักใช้เครื่องทดสอบแบบไฟฟ้าเชิงกลรุ่น 3300 หรือ 5500 ที่ติดตั้งโหลดเซลล์ที่มีขนาดเหมาะสมและ ฟิกซ์เจอร์สำหรับการทดสอบการยึดติดภายใน โดยฟิกซ์เจอร์ของบริษัทจะได้รับการออกแบบตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบโมดูลการทดสอบแรงดึงของ Bluehill Lite หรือ Bluehill2 ประกอบไปด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบที่หลากหลายเพื่อให้ผู้ใช้งานมีความยืดหยุ่นที่จะสร้างวิธีทดสอบเพื่อให้ตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบนานาชาติและคำนวณผลการทดสอบหรือสร้างรายงานโดยอัตโนมัติชิ้นตัวอย่างโอเอสแอลขนาดกว้าง 50 mm. และยาว 50 mm. นำมายึดติดกับแท่งเหล็กโดยใช้กาวอีพอกซีซึ่งมีความแข็งแรงสูงมากออกแรงกดเพื่อให้โอเอสแอลติดกับแท่งเหล็ก นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบแรงดึงด้วยอัตรา 0.0026mm/s บันทึกแรงสูงสุด (P_{max}) ที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกหัก ความแข็งแรงของการยึดติดภายใน (IB) ในหน่วยMPaคำนวณจาก

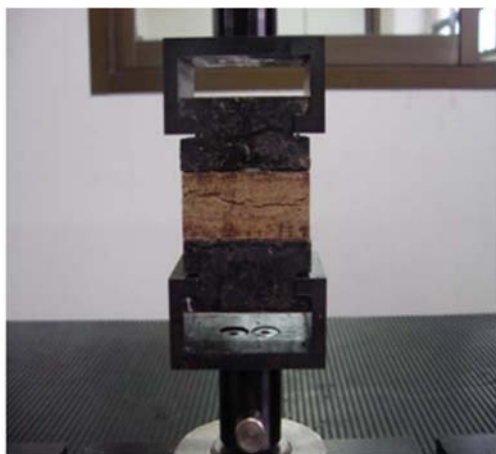
$$IB = \frac{P_{max}}{A} = \frac{P_{max}}{bl} \dots\dots\dots(2.26)$$

เมื่อ P_{max} = แรงกดสูงสุด (N)

A = พื้นที่หน้าตัด (mm²)

b = ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง (mm)

l = ความยาวของชิ้นตัวอย่าง (mm)



ภาพที่ 2.47 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

2.12 การทดสอบทางกายภาพ

2.21.1 ความหนาแน่น (อังกฤษ: Density, สัญลักษณ์: ρ อักษรกรีก โร) เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ยิ่งวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้น มวลต่อหน่วยปริมาตรก็ยิ่งมากขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง (เช่น เหล็ก) จะมีปริมาตรน้อยกว่าวัตถุความหนาแน่นต่ำ (เช่น น้ำ) ที่มีมวลเท่ากัน หน่วยเอสไอของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3)

ความหนาแน่นเฉลี่ย (Average Density) หาได้จากผลหารระหว่างมวลรวมกับปริมาตรรวม ดังสมการ

$$\text{โดย } \rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(2.27)$$

ρ คือความหนาแน่นของวัตถุ (Kg/cm^3)

m คือมวลรวมของวัตถุ (Kg)

V คือปริมาตรรวมของวัตถุ (cm^3)

เครื่องมือที่ใช้วัดความหนาแน่นของของเหลวคือ พิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) เครื่องมือวัดความหนาแน่นของก๊าซคือ แก๊สปิคโนมิเตอร์ (Gas Pycnometer) ความหนาแน่นของสสารต่างๆ สสารที่มีความหนาแน่นสูงสุดที่รู้จักกัน คือสสารที่อยู่ในดาวนิวตรอนที่เรียกว่านิวตรอนเนียมใจกลางหลุมดำ ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ไม่มีปริมาตร ดังนั้นจึงไม่สามารถหาความหนาแน่นได้ สสารที่หนาแน่นที่สุดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนโลก คือ ธาตุอูเรเนียม มีความหนาแน่นประมาณ 22650 Kg/cm^3



ภาพที่ 2.48 ตัวอย่างคอลัมน์สำหรับทดสอบแบบ Density Gradient Technique

จากนั้นจึงทำการเขียนกราฟระหว่างตำแหน่งที่ลอย (Float Position) กับความหนาแน่นของกระจกลอย (Float Glass) เพื่อให้เกิดเป็นการเปรียบเทียบ (Calibration Line) หลังจากนั้นเมื่อได้วัสดุทดสอบที่ต้องการทราบค่าความหนาแน่น (Density) ลงไป ก็จะทำการวัดตำแหน่งที่วัสดุนั้นลอยอยู่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบและทำการอ่านค่าต่อไปในกรณีที่วัสดุทดสอบไม่ลอยในตำแหน่งของเหลว (Liquid Column) อาจจะเป็นไปได้ว่าช่วงของความหนาแน่น (Density) ของวัสดุนั้นไม่เหมาะสม หรือ จับคู่ (Match) กับช่วงความหนาแน่นของของเหลวที่บรรจุอยู่ในแก้ว (Column) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงอาจจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนชนิดของของเหลวด้วย สำหรับตัวอย่างของของเหลวและค่าความหนาแน่นที่เหมาะสม แสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ระบบของของเหลวที่แนะนำไว้สำหรับทดสอบหาความหนาแน่น

ระบบของเหลว	ช่วงค่าความหนาแน่น (g/ml)
	Low Density
Methanol – Benzyl Alcohol	0.80 - 0.92
Isopropanol - Water	0.79 - 1.00
Isopropanol – Diethylene Glycol	0.79 - 1.11
Ethanol – Carbontetrachloride (CCl ₄)	0.79 - 1.59
	0.79 - 1.00
Isopropanol – Water	0.87 - 1.59
14 – 1,3-Dibromopropane	1.99 - 2.18
1,3 – Dibromopropane – Ethylenebromide	2.18 - 2.89

สูตรที่ใช้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบ (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}} \dots\dots\dots (2.28)$$

2.12.2 การทดสอบการพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling, TS)

<http://www.reocities.com>[38] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ตัด โอเอสแอลขนาด 150mm.x 150 mm. วัดความหนาที่ระยะ 25mm. จากจุดกึ่งกลางของแต่ละขอบบันทึกผลรวมของความหนาทั้งสี่จุดเป็นความหนาก่อนการทดสอบ $t(o)$ จุ่มชิ้นตัวอย่างในน้ำโดยให้ขอบบนอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ 25mm.

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำพักไว้ 10 นาที แล้ววัดความหนาใหม่การพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling, TS) คำนวณโดย

$$\text{การพองตัวด้านความหนา} = \frac{\text{ความหนาหลังแช่น้ำ} - \text{ความหนาก่อนแช่น้ำ}}{\text{ความหนาก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \dots \dots \dots (2.29)$$

เมื่อ $TS_{(24)}$ = การพองตัวด้านความหนาที่ 24 ชั่วโมง (%)

$t_{(24)}$ = ผลรวมของความหนาของ 4 จุดหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (mm.)

$t_{(0)}$ = ผลรวมของความหนาของ 4 จุดก่อนแช่น้ำ (mm.)

2.12.3 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) [http:// sutir/bitstream.pdf](http://sutir/bitstream.pdf) [39] มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของพลาสติกส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดและคอมโพสิตของวัสดุตัวอย่างเช่น วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอน อันได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิไธรีน เป็นวัสดุที่ทนน้ำมาก ในขณะที่วัสดุที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนหรือกลุ่มออกซิไฮโดรเจนจะไวต่อการดูดซึมน้ำมาก วัสดุที่ประกอบด้วยคลอรีน ไบรอนีน หรือฟลูออรีน จะเป็นวัสดุที่ทนน้ำ ลักษณะการดูดซึมน้ำของพลาสติกอาจเปลี่ยนแปลงโดยการเติมสารเติมแต่ง ตัวอย่างเช่น เส้นใย เส้นใยแก้ว เป็นต้น พลาสติกบางประเภทดูดซึมน้ำได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ต้องการให้มีการดูดซึมน้ำต่ำได้แก่ ใบกวนในเครื่องซักผ้า ผลิตภัณฑ์สำหรับใส่อาหาร สปริงเกลอร์ เป็นต้น การทดสอบการดูดซึมน้ำของพลาสติกสามารถทำได้ง่ายโดยอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เครื่องชั่งวิเคราะห์ (Analytical balance) ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตู้อบ (Oven) ที่สามารถให้อุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ และ โถดูดความชื้น (Desiccators) ชิ้นทดสอบอาจเป็นลักษณะแผ่นดิสก์, แท่ง หรือท่อ ขนาดเปลี่ยนแปลงตามชนิดของชิ้นทดสอบ วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ

1. อบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ 24 ชั่วโมง
2. ทิ้งให้ชิ้นทดสอบเย็นลงในโถดูดความชื้น
3. ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ (น้ำหนักก่อนการดูดซึมน้ำ)
4. แช่ชิ้นทดสอบลงในน้ำกลั่น
5. เมื่อครบตามกำหนดเวลานำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วย ผ้า

สะอาดหรือกระดาษทิชชู

6. ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบทันที (น้ำหนักหลังการดูดซึมน้ำ)
7. คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำตามสมการที่ 2.21

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{P_w - P_D}{P_D} \dots\dots\dots (2.30)$$

เมื่อ P_w = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการทดลองดูดซึมน้ำ

P_D = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบดูดซึมน้ำ

2.13 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean , Average , $\bar{x}$) <http://pibul2.psru.ac.th>[40]มีข้อมูลอ้างอิงไว้ว่า ค่าเฉลี่ยเลขคณิต($\bar{x}$) จัดว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญมากในวิชาสถิติ เพราะค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ดีที่สุด เป็นค่าที่ไม่เอนเอียง เป็นค่าที่มีความคงเส้นคงวาเป็นค่าที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด และเป็นค่าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ค่าเฉลี่ยเลขคณิตก็มีข้อจำกัดในการใช้ เช่น ถ้าข้อมูลมีการกระจายมาก หรือข้อมูลบางตัวมีค่ามากหรือน้อยจนผิดปกติ หรือข้อมูลมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว ค่าเฉลี่ยเลขคณิตจะไม่สามารถเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลได้ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตเมื่อข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ ($\bar{x}$) ในกรณีที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสามารถหาได้โดย

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (2.31) \text{เมื่อ}$$

$\bar{X}$ แทนผลของของข้อมูล

x_i แทนค่าสังเกตของข้อมูลลำดับที่ i

n แทนจำนวนตัวอย่างข้อมูล

บทที่ 3

การดำเนินการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานในการจัดทำโครงการ โดยจะใช้ทฤษฎีในบทที่ 2 ช่วยในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น จากการเข้าไปศึกษากระบวนการทำและการทดสอบหลังคาเขียว เป็นเป็นวัสดุทำแผ่นมุงหลังคาที่สร้างจากวัสดุรีไซเคิลโดยนำกล่องเครื่องดื่มที่ใช้แล้วมาทำเป็นหลังคาบ้าน ซึ่งสามารถนำกล่องเครื่องดื่มมาใช้ได้ทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นกล่องนม กล่องชาเขียว กล่องน้ำผลไม้ เป็นต้น และวางแผนในการทดสอบประสิทธิภาพของหลังคารีไซเคิลนี้ด้วย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำแผ่นหลังคาที่ได้จากวัสดุรีไซเคิลจําพวกกล่องเครื่องดื่มนี้ไปช่วยเหลือผู้ประสบภัยธรรมชาติ และเป็นการลดปริมาณของขยะ โดยการนำวัสดุรีไซเคิลทำหลังคาดังกล่าว

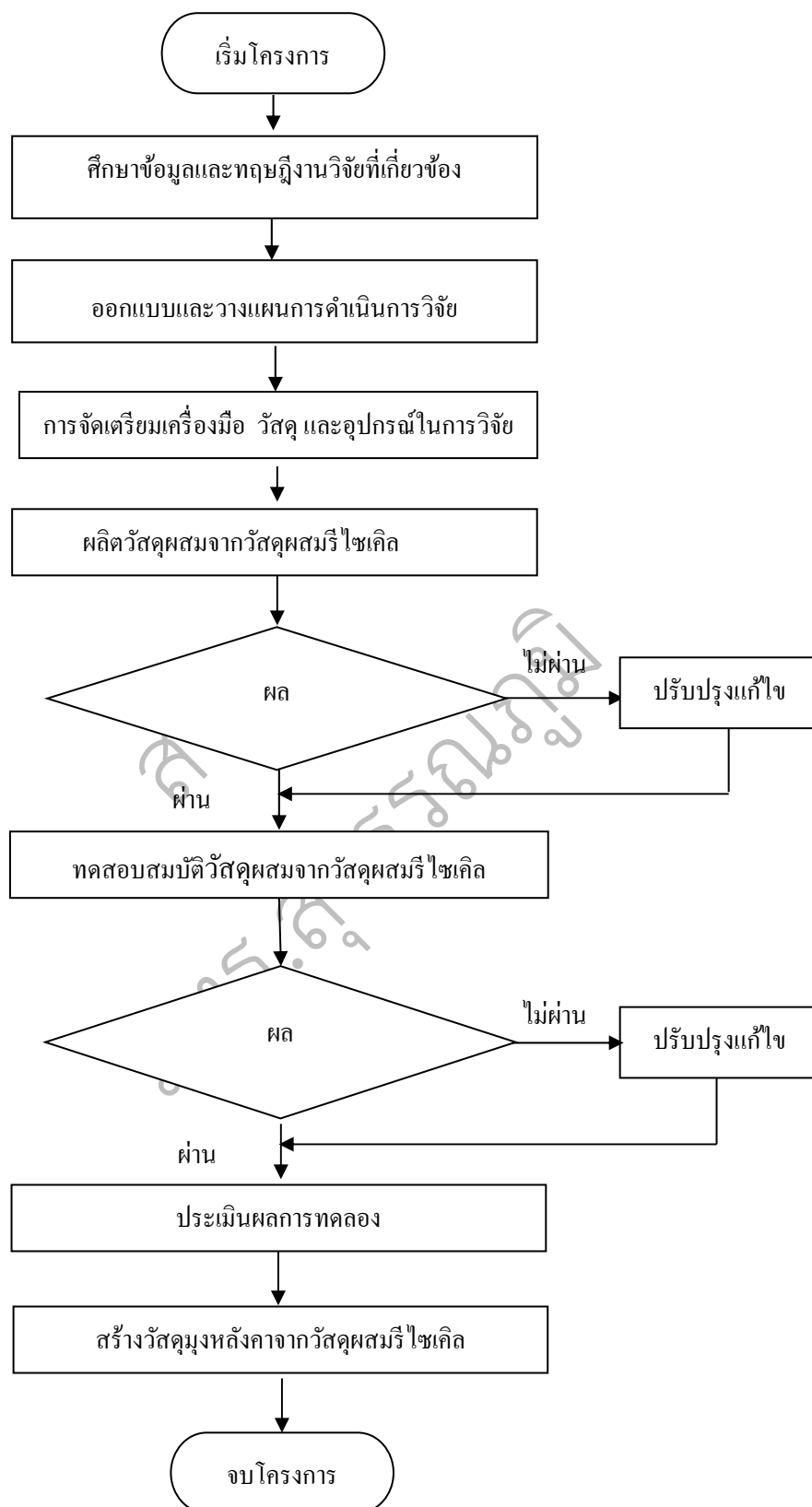
3.1 การวางแผน

การวางแผนงานนั้น เป็นการกำหนดลำดับขั้นตอนการทำโครงการได้นำเน้นการไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ มีระยะดำเนินงานที่เหมาะสมกับการจัดทำโครงการ โดยได้วางแผนการดำเนินงานออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงาน มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยจัดลำดับขั้นตอนการทดสอบวัสดุมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล จะต้องมีการวางแผนและจัดลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อให้การทำงานดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

- 3.1.1 ศึกษาข้อมูลของแผนงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหลังคารีไซเคิล
- 3.1.2 วิเคราะห์สาเหตุของผลการทดสอบหลังคารีไซเคิล
- 3.1.3 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาผลของการทดสอบหลังคารีไซเคิล
- 3.1.4 ดำเนินการทดสอบหลังคารีไซเคิล
- 3.1.5 ทำการเก็บข้อมูลหลังจากทดสอบหลังคารีไซเคิล
- 3.1.6 สรุปผลการทดลอง
- 3.1.7 สร้างผลิตภัณฑ์

3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ



แผนภูมิที่ 3.1 การดำเนินงานวิจัยการศึกษาวัสดุแข็งหลังจากวัสดุผสมรีไซเคิล

3.2 การเตรียมการ

ผู้จัดทำโครงการจึงได้มีแนวคิดที่จำนากล่อง UHT ที่เหลือจากการบริโภคเป็นจำนวนมาก ทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและทางด้านกายภาพ ที่เปลี่ยนแปลงไปของคอมโพสิต ว่ามีการใช้งานได้มีประสิทธิภาพอย่างไร การใช้อลูมิเนียมฟอยล์ และพลาสติกสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้และยังช่วยลดปริมาณขยะที่มีเป็นจำนวนมากให้ลดลงได้ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นมุงหลังคาที่ทำจากวัสดุรีไซเคิลนี้ทั้งทางกายภาพและทางกลโดยจะทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิในการอัดร้อน 180°C ในขนาดอลูมิเนียมฟอยล์ที่แตกต่างกัน

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแผ่นมุงหลังคาที่ทำจากวัสดุรีไซเคิล

3.2.1.1 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน



ภาพที่ 3.1 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

3.2.1.2 เครื่องแยกเชื้อกระดาษกับอลูมิเนียมฟอยล์



ภาพที่ 3.2 เครื่องคัดแยกเชื้อกระดาษและอลูมิเนียมฟอยล์

3.2.1.3 เครื่องเลื่อยวงเดือนสำหรับตัดชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน



ภาพที่ 3.3 เลื่อยวงเดือน

3.2.1.4 เครื่องขึ้นพลาสติกและแผ่นพลาสติก Polyethylene Terephthalate (PET)



ภาพที่ 3.4 เครื่องขึ้นพลาสติก

3.2.1.5 ตะแกรงสำหรับแยกขนาดของอนุภาคนิยมฟอยล์ขนาด 60 mm. , 45 mm. และ 25 mm.



ภาพที่ 3.5 ตะแกรงสำหรับแยกขนาด

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2.1 เครื่องทดสอบแรงดัด

ในการทดสอบความต้านแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่นเป็นการแสดงถึงความสามารถในด้านแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่นแผ่นวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิล ของงานวิจัยนี้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ ทดสอบแบบ 3 จุด (Three Point Bending) คือ ให้แรงกดลงที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบแท่งกดและแท่งรองรับมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปวงกลม หรือรูปครึ่งวงกลมระยะห่างของแท่งรองรับเท่ากับ 15 หรือ 24 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดัด Nistron รุ่น 4466H1977



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดัด

3.2.2.2 เครื่องทดสอบค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

วิธีการทดสอบค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Tensile Strength Serpendicular to Plane of Board) ในการทดสอบค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของงานวิจัยนี้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบแผ่นดิ่ง ทำด้วยโลหะ ขนาดไม่น้อยกว่า 50x 50x8 มม. ดัดผิวหน้าทั้งสองของชิ้นทดสอบกับแผ่นดิ่ง โดยใช้กาวร้อนเหลว แล้วดึงให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน (เกิดรอยแยกในชั้นไม้) เครื่องทดสอบที่ใช้คือ Otto Wolpertwerke รุ่น ws150m-Sv078



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกด

3.2.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM 1037-99 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ ยี่ห้อ Fintech รุ่น ssw-101d



ภาพที่ 3.8 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ

3.2.2.4 เครื่องวัดความหนาแน่นของวัสดุทั้งของแข็งและของเหลวทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D792 เครื่องทดสอบที่ใช้ คือ Densemeter รุ่น m-300y



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นของวัสดุ

3.2.2.5 เครื่องมือวัดขนาด



ภาพที่ 3.10 ตลับเมตร



ภาพที่ 3.11 เวอร์เนียคาลิเปอร์



ภาพที่ 3.12 ไมโครมิเตอร์

3.2.2.9 วัสดุ



ภาพที่ 3.13 กล่องเครื่องดื่มประเภท UHT ที่เหลือใช้

3.3 ออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงการรับแรงทางกลของขนาดของแผ่นมุงหลังคาที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ การจะทำให้การทดลองออกมามีคุณภาพและตรงจุดมุ่งหมาย ในส่วนของการออกแบบนี้ จะใช้พอลิเมอร์ที่ได้จากการแยกส่วนที่เป็นกระดาษออกโดยนำชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดจนเป็นแผ่นมุงหลังคาไปทดสอบ 7 ชนิด คือ ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงทดสอบความหนาแน่น การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น การทดสอบการพองตัวด้านความหนา ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และทดสอบการดูดซึมน้ำให้ได้ตามมาตรฐานชิ้นงานทดสอบ นำชิ้นงานไปทดสอบหาค่าและทำการวิเคราะห์และบันทึกผล

3.3.1 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดของอลูมิเนียมฟอยล์ทั้ง 3 ขนาด คือ หยาบปานกลางและละเอียดชนิดละ 3 ชิ้น ชิ้นละ 3 จุด ขนาด $50 \times 150 \times 8$ มม. ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็ง จะทำการเลือกใช้การทดสอบแบบร็อกเวลล์สเกล B ใช้หัวบอลขนาด $1/16$ นิ้ว น้ำหนักกด 100 kg. จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D785 คำนวณและบันทึกผล ผลที่ได้มีหน่วยเป็น HRB

3.3.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นและการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด คือ ส่วนผสมขนาดใหญ่ ปานกลางและขนาดเล็ก ขนาดชิ้นทดสอบ $50 \times 150 \times 8$ มม. ชนิดละ 3 ชิ้น ทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นและค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 และมาตรฐาน ASTM D 143 ตามลำดับ แล้วบันทึกผลที่ได้มีหน่วยเป็น MPa

3.3.3 การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด 3 ชิ้น ขนาดชิ้นงาน $50 \times 50 \times 8$ มม. มาทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D 638 จะทำการยึดจับผิวชิ้นงานทั้งบนและล่างด้วยกาวที่มีการยึดติดสูง จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบทำการดึงจนขาดกลางอ่านค่าและบันทึกผล ผลที่ได้ มีหน่วยเป็น MPa

3.3.4 การทดสอบความหนาแน่น

นำชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมที่ได้จากการขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด 3 ชิ้น ขนาดชิ้นทดสอบ $50 \times 50 \times 8$ มม. ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความหนาแน่นจะทำการชั่งน้ำหนักก่อนการ

ทดสอบ จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 792 อ่านค่าและบันทึกผลผลที่ได้ มีหน่วยเป็น g/cm^3

3.3.5 การทดสอบการพองตัวด้านความหนาและการดูดซึมน้ำ

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป ทั้ง 3 ชนิด มาทำการทดสอบการพองตัวด้านความหนาและการทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM 1037-99 ชนิดละ 8 ชิ้น ขนาดชิ้นทดสอบ $50 \times 50 \times 8$ มม. มาทำการแช่น้ำโดยจะทำการชั่งน้ำหนักและความหนาก่อนการทดสอบ จากนั้นนำไปแช่น้ำโดยให้ห่างจากผิวน้ำ 25 มม. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความหนาหลังการทดสอบ บันทึกผลการทดสอบ ผลที่ได้จะมีหน่วยเป็น %

ตารางที่ 3.2 การออกแบบจำนวนชิ้นการทดลองทั้งหมด

รายการ	ความละเอียดของวัสดุ		
	หยาบ	ปานกลาง	ละเอียด
ทดสอบความแข็ง	3 ชิ้น	3 ชิ้น	3 ชิ้น
หาค่า MOR และ MOE	3 ชิ้น	3 ชิ้น	3 ชิ้น
ทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวน้ำ	3 ชิ้น	3 ชิ้น	3 ชิ้น
ทดสอบความหนาแน่น	3 ชิ้น	3 ชิ้น	3 ชิ้น
การหาค่าการพองตัว และ การดูดซึมน้ำ	8 ชิ้น	8 ชิ้น	8 ชิ้น

3.4 การดำเนินงาน

การศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุผสมรีไซเคิล ประเภทกล่องเครื่องดื่ม UHT มาใช้งานเพื่อทำเป็นวัสดุผนังหลังคานั้นเป็นการเก็บเอาสิ่งที่เหลือใช้และมีจำนวนมากจากการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้งาน เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่โดยไม่ต้องใช้วัตถุดิบในการผลิตใหม่ ทำให้เป็นการช่วยลดพลังงาน และรวมถึงเป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อมด้วย โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.4.1 การจัดเตรียมกล่องเครื่องดื่มประเภท UHT มาทำการคัดแยกเอาเยื่อกระดาษออกจากอะลูมิเนียมฟอยล์และพลาสติก ด้วยเครื่องแยกเยื่อกระดาษโดยใช้วิธีการปั่นด้วยเครื่องปั่น โดยมีวิธีการดังนี้

1) จัดหากล่อง UHT จำนวนประมาณ 20 กิโลกรัม. นำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

2) นำเข้าเครื่องปั่นเพื่อแยกเยื่อกระดาษออกโดยปั่นให้ละเอียดเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 3.14 การปั่นกระดาษที่มาจากกล่องนมให้ละเอียด

3) ส่วนที่เป็นกระดาษจะแยกออกจากอะลูมิเนียมฟอยล์และพลาสติก แล้วทำการกรองเพื่อแยกเอาเยื่อกระดาษออก จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง



ภาพที่ 3.15 แผ่นวัสดุผสมอะลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกที่ได้จากกล่อง UHT

3.4.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงาน เป็นการนำแผ่นวัสดุผสมอูมิเนียมพอยล์กับพลาสติกที่ได้จากกล่องเครื่องดื่ม UHT มาป่นให้ละเอียดอีกครั้ง หลังจากนั้นทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงสำหรับแยกขนาด 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ (60x 60 มม.) ปานกลาง (45 x 45 มม.) และขนาดเล็ก (25x 25 มม.) แล้วนำไปเข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C โดยมีลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) นำอูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากการป่นไปทำการลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียด



ภาพที่ 3.16 การบดย่อยแผ่นวัสดุผสม

2) นำชิ้นวัสดุผสมที่บดย่อยมาทำการคัดแยกขนาด โดยใช้ตะแกรงสำหรับแยกจำนวน 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ ขนาดตะแกรง 60x 60 มม. ขนาดปานกลาง มีขนาดตะแกรง 45 x 45 มม. และขนาดเล็ก มีขนาดตะแกรง 25 x 25 มม. มาใช้ในการแยกขนาด ก่อนนำชิ้นวัสดุผสมอูมิเนียมพอยล์กับพลาสติก ที่ผ่านการคัดแยกไปสู่ขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไป



ภาพที่ 3.17 วัสดุผสมอูมิเนียมพอยล์กับพลาสติกขนาดใหญ่



ภาพที่ 3.18 วัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกขนาดปานกลาง



ภาพที่ 3.19 วัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกขนาดเล็ก

3) นำวัสดุผสม ที่ได้จากการคัดแยกแล้ว นำมาโรยบนแผ่นเหล็กเพื่อขึ้นรูปแผ่น
เป็นแผ่น



ภาพที่ 3.20 การวางวัสดุผสมที่ทำเป็นชิ้นเล็กๆแล้วบนแผ่นเหล็ก

4) นำเข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180°C เพื่อหลอมพลาสติกที่ผสมอยู่
ทั้งนี้ พลาสติกจะเป็นตัวยึดอะลูมิเนียมฟอยล์ให้ติดเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่ต้องใช้ กาวหรือสารเคมี
ใดๆ ในการผลิตหลังจากการอัดแล้วจะได้เป็นแผ่นเรียบออกมา



ภาพที่ 3.21 นำเข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180°C



ภาพที่ 3.22 แผ่นชิ้นงานจากวัสดุผสม อลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก

5) ตัดแผ่นวัสดุผสมเพื่อทำเป็นชิ้นงานทดสอบตามขนาดที่กำหนดไว้ด้วยเลื่อย
วงเดือน โดยให้ได้ขนาด $50 \times 50 \times 8$ มม. จำนวน 51 ชิ้นและขนาด $50 \times 150 \times 8$ มม.จำนวน 9 ชิ้น



ภาพที่ 3.23 แผ่นชิ้นงานทดสอบ ขนาด $50 \times 50 \times 8$ มม.



ภาพที่ 3.24 แผ่นชิ้นงานทดสอบ ขนาด 50 x 150x8 มม.

3.5 การทดสอบชิ้นงาน

การทดสอบในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญในการศึกษาสมบัติของคอมโพสิตของงานวิจัยเล่มนี้ เพราะเป็นขั้นตอนที่มีความละเอียดมาก ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีความผิดพลาดไม่ได้หรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ผู้ดำเนินโครงการจึงให้ความสำคัญเป็นพิเศษ โดยการศึกษาทฤษฎีการทดสอบและวิธีการทดสอบอุปกรณ์ในการทดสอบรวมถึงขั้นตอนการทดสอบและวิธีการวัดผลอย่างละเอียดโดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.1 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นทดสอบขนาด ใหญ่ ปานกลาง และขนาดเล็ก ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์สเกล B โดยจะใช้หัวบอลโลหะ 1/16 นิ้ว ใช้น้ำหนักกด 100 กิโลกรัม. โดยจะทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น โดยในหนึ่งชิ้นจะทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ตามมาตรฐาน ASTM D 785 มีวิธีการการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบจากวัสดุผสม อลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติกชนิดละ 3 ชิ้น



ภาพที่ 3.25 เตรียมชิ้นงานในการทดสอบความแข็ง

- 2) นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแบบร็อกเวลล์สเกล B ใช้หัวกดเป็นหัวกดบอล ขนาด 1/16 นิ้ว น้ำหนักกด 100 กิโลกรัม โดยจะทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ต่อ ชิ้นงาน



ภาพที่ 3.26 การทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

- 3) วัดความลึกของรอยกดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดรอยกด



รอยกดจากการทดสอบ

ภาพที่ 3.27 รอยกดจากการทดสอบความแข็ง

- 4) กำหนดผลการทดสอบทำการบันทึกผลในตารางภาคผนวก ก. 1

3.5.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักและการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่น

นำชิ้นทดสอบวัสดุผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ทั้ง 3 ขนาด ไปทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นและค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักด้วยเครื่องทดสอบแรงคัตตามมาตรฐาน ASTM D790 และมาตรฐาน ASTM D143 ตามลำดับโดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 3 ชิ้น มีวิธีการดังนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานวัสดุผสมสำหรับทดสอบทั้ง 3 ชนิด ะละ 3 ชิ้น ขนาด $50 \times 150 \times 8$ มม.



ภาพที่ 3.28 ชิ้นสำหรับทดสอบ MOE และ MOR

- 2) นำชิ้นทดสอบติดตั้งในเครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบโดยทำการตั้งพารามิเตอร์ดังนี้

อุณหภูมิ	=	25	°C
น้ำหนักโหลด	=	10	KN
ความเร็วในการกด	=	14	mm/min
ระยะสแปน	=	64	mm.



ภาพที่ 3.29 การติดตั้งชิ้นทดสอบ MOE และ MOR

- 3) เครื่องกำลังทดสอบชิ้นงานจะเห็นว่ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 3.30 การทดสอบ MOE และ MOR

4) กราฟจะแสดงผลการทดลองออกมาและทำการบันทึกผลดังตารางใน

ภาคผนวก ก. 2

3.5.3 การทดสอบแรงดึงดึงจากกับผิวหน้า

นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยจะทดสอบชนิดละ 3 ชิ้น มีวิธีการดังนี้

1) เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ ชนิดละ 3 ชิ้น ขนาด $50 \times 50 \times 8$ มม.



(a) หยาบ (b) ปานกลาง (c) ละเอียด

ภาพที่ 3.31 ชิ้นทดสอบแรงดึงดึงจากกับผิวหน้า

2) นำชิ้นทดสอบจับเข้ากับเครื่องทดสอบ และทำการดึงชิ้นงาน



ภาพที่ 3.32 การดึงชิ้นงาน

3) การแยกออกจากกันของชั้นทดสอบ ภายหลังการทดสอบ



ภาพที่ 3.33 การแยกออกจากกันของชั้นทดสอบ

4) อ่านค่าและคำนวณผลทำการบันทึกผลดังตารางในภาคผนวก ก. 3

3.5.4 การทดสอบความหนาแน่น

นำชั้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 792 โดยจะทดสอบชนิดละ 3 ชิ้น มีวิธีการดังนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ ชนิดละ 3 ชิ้นขนาด 50 x 50x8 มม.



(a) ใหญ่ (b) ปานกลาง (c) เล็ก

ภาพที่ 3.34 ชั้นทดสอบความหนาแน่น

- 2) นำชิ้นงานใส่เครื่องทดสอบและเริ่มการทดสอบโดยจะคำนวณผลให้โดย

อัตโนมัติ



ช่องใส่ชิ้นงาน

ภาพที่ 3.35 เครื่องทดสอบความหนาแน่น

3) อ่านค่าและทำการบันทึกผลดังตารางในภาคผนวก ก. 4

3.5.5 การทดสอบการพองตัวด้านความหนาและการดูดซึมน้ำ

นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยจะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 8 ชิ้น และการทดสอบการพองตัวด้านความหนา จะทดสอบชิ้นงานชนิดละ 3 ชิ้น ทั้งสองการทดสอบนี้ตามมาตรฐาน ASTM 1037-99 มีวิธีการดังนี้

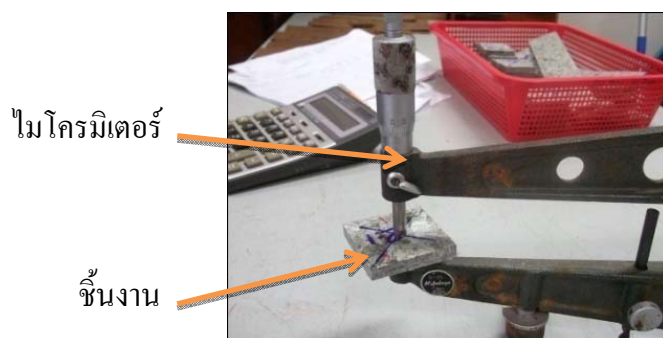
1) เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ ชนิดละ 3 ชิ้นขนาด $50 \times 50 \times 8$ มม. โดยการทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งที่จะทำการวัดเพียงตำแหน่งเดียว เพื่อการวัดความหนา ก่อนและหลังการทดสอบ เพื่อค่าการวัดก่อนและหลังจะได้ไม่คลาดเคลื่อน



(a) ใหญ่ (b) ปานกลาง (c) เล็ก

ภาพที่ 3.36 ชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำและการพองตัวด้านความหนา

2) วัดความหนาก่อนทำการแช่น้ำ



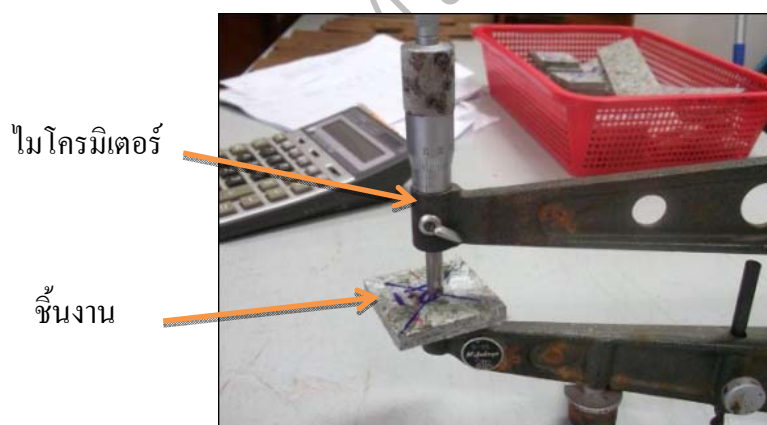
ภาพที่ 3.37 การวัดความหนาก่อนแช่น้ำ

3) ทำการแช่น้ำ โดยจะแช่ไว้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.38 การแช่น้ำ

4) ทำการวัดขนาดหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วทำการคำนวณโดยใช้สูตรและบันทึกผลดังตารางในภาคผนวก ก. 5 และภาคผนวก ก. 6



ภาพที่ 3.39 การวัดหลังแช่น้ำ

3.5.6 การวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงาน

นำชิ้นทดสอบจากอูมิเนียมฟอยล์หยาบปานกลาง และละเอียดไปทำการตรวจดูโครงสร้างของชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยจะใช้กำลังขยาย 35 เท่า 100 เท่า และ 200 เท่ามีวิธีการดังนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบจากอูมิเนียมฟอยล์หยาบปานกลางและละเอียด อย่างละ 1 ชิ้น ขนาดไม่น้อยกว่า 5x5x5 มม. ด้วยเครื่องตัดจากใบตัดเพชร



ภาพที่ 3.40 ตัดชิ้นทดสอบด้วยใบตัดเพชร



(a) ใหญ่ (b) ปานกลาง (c) ละเอียด

ภาพที่ 3.41 การเตรียมชิ้นงานในการส่องโครงสร้าง

- 2) ทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายแบบละเอียดแล้วล้างให้สะอาด



ภาพที่ 3.42 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

- 3) รอให้แห้งแล้วทำการติดชิ้นงานกับฐานรองรับชิ้นงานด้วยคาร์บอนเทป



ภาพที่ 3.43 ติดชิ้นงานกับฐานรองรับชิ้นงาน

- 4) นำไปเคลือบทองโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที



ภาพที่ 3.44 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแล้ว

- 5) ทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ได้ผลดังบทที่ 4



ภาพที่ 3.45 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6 การผลิตวัสดุผนังหลังคา

จากการดำเนินการศึกษาสมบัติของคอมโพสิต สามารถทราบถึงสมบัติที่ดีที่สุดของวัสดุผสม อลูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ตามขนาดชิ้นส่วนผสม 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดใหญ่ ปานกลาง และขนาดเล็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติทั้งทางกล และทางกายภาพ ทั้งหมดและทำการสรุปผลการทดลองเกี่ยวกับ การเลือกขนาดของวัสดุผสมที่มีผลถึงสมบัติวัสดุ เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุผนังหลังคาแบบแผ่นลอน จากวัสดุรีไซเคิล โดยจะผลิต ขนาด 0.90 x 2.40 เมตร จำนวน 10 แผ่น

ในการวิเคราะห์ข้อมูลและเลือกขนาดของวัสดุผสม เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุผนังหลังคานั้น จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์และสรุปว่าขนาดของวัสดุผสมมีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม ที่จะนำไปผลิตเป็นวัสดุผนังหลังคา



ภาพที่ 3.46 แผ่นหลังคาลอน ผลิตจากวัสดุผสมรีไซเคิล ประเภทกล่อง UHT

หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดและทำการสรุปผลการเลือกขนาดวัสดุผสม เพื่อผลิตเป็นวัสดุผนังหลังคา โดยได้จัดทำวัสดุแผ่นผนังหลังคาจำนวน 10 แผ่น จากวัสดุผสมที่ได้จากการวิจัย ดังขั้นตอนการผลิตแผ่นผนังหลังคา ในภาคผนวก ค.

การศึกษาคอมโพสิตในโครงการนี้ ขั้นตอนการปฏิบัติงานของการดำเนินงาน โครงการจะกล่าวมาตั้งแต่การวางแผน การออกแบบการทดลอง การเตรียมวัสดุจัดทำชิ้นงาน ทดสอบ การดำเนินการสร้างและทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ โดยทำการ ทดสอบ ความแข็ง ทดสอบความหนาแน่น การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักการทดสอบค่า สัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นการทดสอบการพองตัวด้านความหนา ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุ นำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมบัติและบันทึกลงในบท

ที่ 4 จากนั้นทำการประเมินผลและวิเคราะห์สรุปผลขนาดของวัสดุผสมอูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก
ที่ใช้ทำวัสดุผนังหลังคา จำนวน 10 แผ่น ต่อไป

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

ลำดับ	รายการ	ปี 2556			ปี 2557								
		ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	เมย.	พค.	มิย.	กค.	สค.	กย.
1	ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆในการดำเนินงาน	↔											
2	เตรียมเครื่องมือ/เครื่องจักรและวัสดุ /อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง				↔								
3	เตรียมวัสดุผสมจากกล่องนม UHT						↔						
4	อัดขึ้นรูป						↔						
5	ทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของชิ้นทดสอบ									↔			
6	ประเมินผลการทดลอง									↔			
7	ออกแบบผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสม รีไซเคิล										↔		
8	สร้างแม่แบบขึ้นรูป										↔		
9	สร้างผลิตภัณฑ์จากแผ่นวัสดุผสมรีไซเคิล											↔	
10	สรุปและปิดโครงการวิจัย												↔

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลดำเนินงาน

จากการดำเนินงานทดสอบในบทที่ 3 ซึ่งคณะผู้จัดทำโครงการได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุทดสอบระหว่างอุณหภูมิเหนียวพอยล์ขนาดหยาบปานกลาง และละเอียด นำมาเปรียบเทียบสมบัติการทดสอบความแข็ง ทดสอบการแตกหัก ทดสอบความหนาแน่น ทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบการพองตัวด้านความหนา ความต้านแรงดึงดึงจากกับผิวหน้า และการทดสอบการยืดหยุ่นด้วยเครื่องทดสอบจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและสรุปผลดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลดำเนินงาน

4.1.1 การประเมินผลการทดสอบค่าความแข็ง

จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบวัสดุผสมจากอุณหภูมิเหนียวพอยล์กับพลาสติก ที่มีขนาดใหญ่ ปานกลาง และขนาดเล็ก ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์สเกล B โดยกดชิ้นงานด้วยหัวบอลขนาด 1/16 นิ้ว ด้วยน้ำหนัก 100 กิโลกรัม โดยจะทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ในหนึ่งชิ้นจะทดสอบ 3 ครั้ง ตามมาตรฐาน ASTM D785 จากนั้นวัดความลึกของรอยกดมาคำนวณหาค่าความแข็งแบบ HRB แล้วแปลงค่าเป็นความแข็งแบบ BHN ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความแข็งจากตารางภาคผนวก ก.1

ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ค่าความแข็ง BHN			
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	66.97	68.04	70.87	68.63
ปานกลาง	65.00	62.73	66.11	64.61
เล็ก	62.58	62.33	60.03	61.65

นำค่าความลึกรอยกดถาวร (e) ของชิ้นงานจากอูมิเนียมฟอยล์เนื้อหยาบ ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 จากตารางภาคผนวก ก.1 มาคำนวณ จะได้

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002} \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ e แทนค่าความลึกรอยกดถาวรของชิ้นงานเท่ากับ 0.25 mm.

$$HRB = 130 - \frac{0.25}{0.002} = 5$$

$$BHN = \frac{7,300}{130 - HRB} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$BHN = \frac{7,300}{130 - 5} = 58.4$$

เพราะฉะนั้น ค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมจากอูมิเนียมฟอยล์กับพลาสติก ขนาดใหญ่ ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 58.4 BHN

นำผลทดสอบค่าความแข็งที่คำนวณได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของวัสดุผสมหาค่าเฉลี่ยจะได้ความแข็งเฉลี่ย

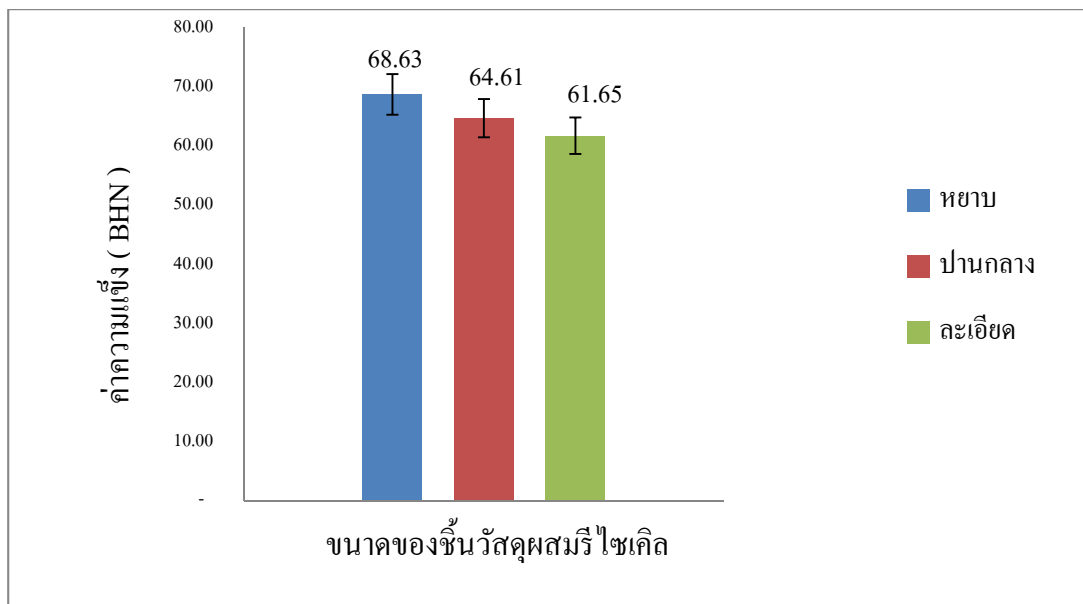
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ x_i แทน ผลทดสอบค่าความแข็ง (BHN)

n แทน จำนวนชิ้นทดสอบ

$\bar{X}$ แทน ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง (BHN)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{66.97 + 68.04 + 70.87}{3} = 68.63 \text{ BHN}$$



แผนภูมิที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับขนาดของวัสดุผสม

4.1.2 การประเมินผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก

จากการทดสอบวัสดุผสม อลูมิเนียมพอลีเอทิลีนพลาสติก ชิ้นผสมขนาดใหญ่ ปานกลาง และขนาดเล็ก ไปทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก ด้วยเครื่องทดสอบแรงดัดใช้น้ำหนัก 10 KN ความเร็วในการกด 14 มม/นาที ระยะสเป้น 64 มม. ทำการทดสอบขนาดละ 3 ชิ้นตามมาตรฐาน ASTM D 143 ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การแตกหัก (MOR) จากตารางภาคผนวก ก. 2

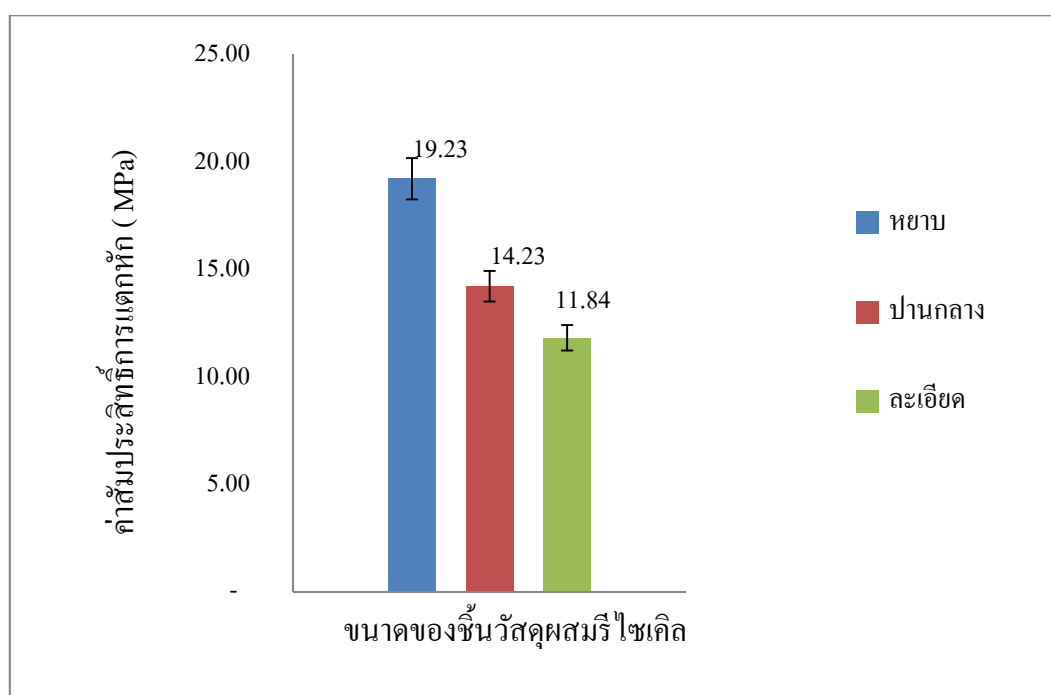
ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ผลการทดสอบ (MPa)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	17.62	20.83	19.23	19.23
ปานกลาง	13.06	15.40	14.23	14.23
เล็ก	14.40	9.30	11.83	11.84

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ x_i แทน ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก(MPa)
 n แทน จำนวนชิ้นทดสอบ
 $\bar{X}$ แทน ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก(MPa)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{17.62+20.83+19.22}{3} = 19.23 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักของชิ้นทดสอบที่มีชิ้นผสมขนาดใหญ่
 มีค่าเท่ากับ 19.23 MPa



แผนภูมิที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักกับขนาดของวัสดุผสม

4.1.3 การประเมินผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น

จากการทดลองนำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ขนาดวัสดุผสม ไปทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น ด้วยเครื่องทดสอบแรงค้ำใช้น้ำหนักโหลด 10 KN ความเร็วในการกด 14 มม/นาที ระยะสแปน 64 มม. ทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ได้ผลดังต่อไปนี้ ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (MOE) จากตารางภาคผนวก ก. 2

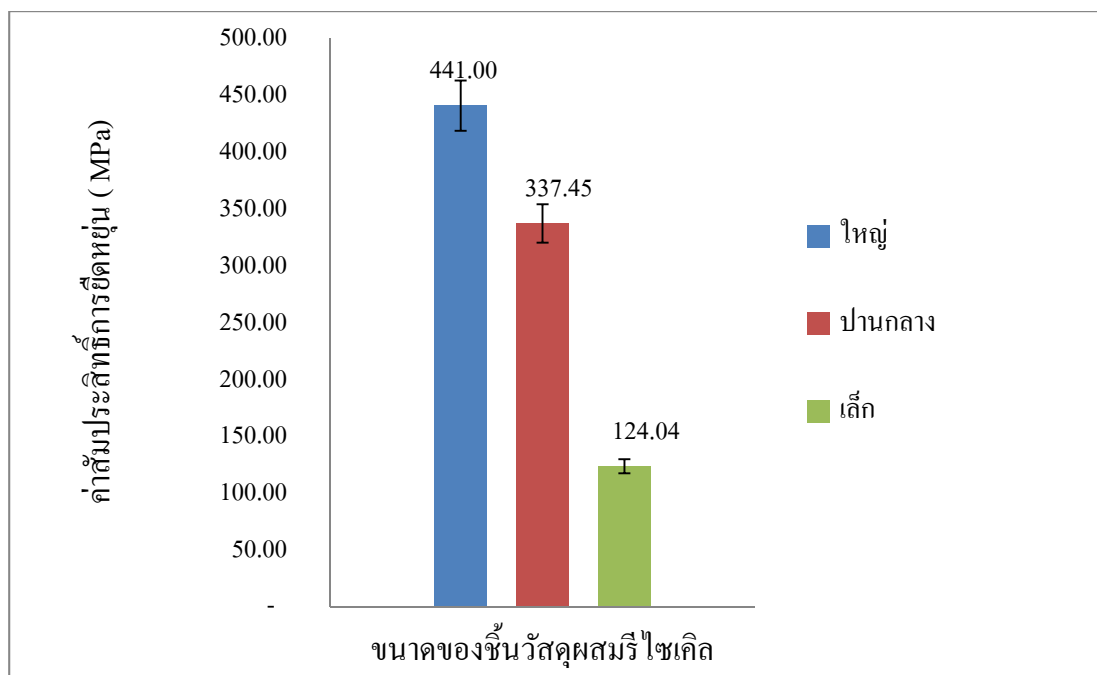
ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ผลการทดสอบ (MPa)			
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	400.20	481.80	441.00	441.00
ปานกลาง	323.30	351.60	337.45	337.45
เล็ก	134.08	114.00	124.04	124.04

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ x_i แทน ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น(MPa)
 n แทน จำนวนชิ้นทดสอบ
 $\bar{X}$ แทน ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น(MPa)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{400.20 + 480.80 + 442.00}{3} = 441.00 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นของการทดสอบที่มีชิ้นวัสดุผสมขนาดใหญ่ มีค่าเท่ากับ 441.00 MPa



แผนภูมิที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดหยุ่นกับขนาดของวัสดุผสม

4.1.4 การประเมินผลทดสอบแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า

จากการทดลองนำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดัด โดยดัดด้านผิวหน้าของทั้ง 2 ด้าน จนหักขาดออกจากกัน โดยจะทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 683 ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าจากตารางภาคผนวก ก. 3

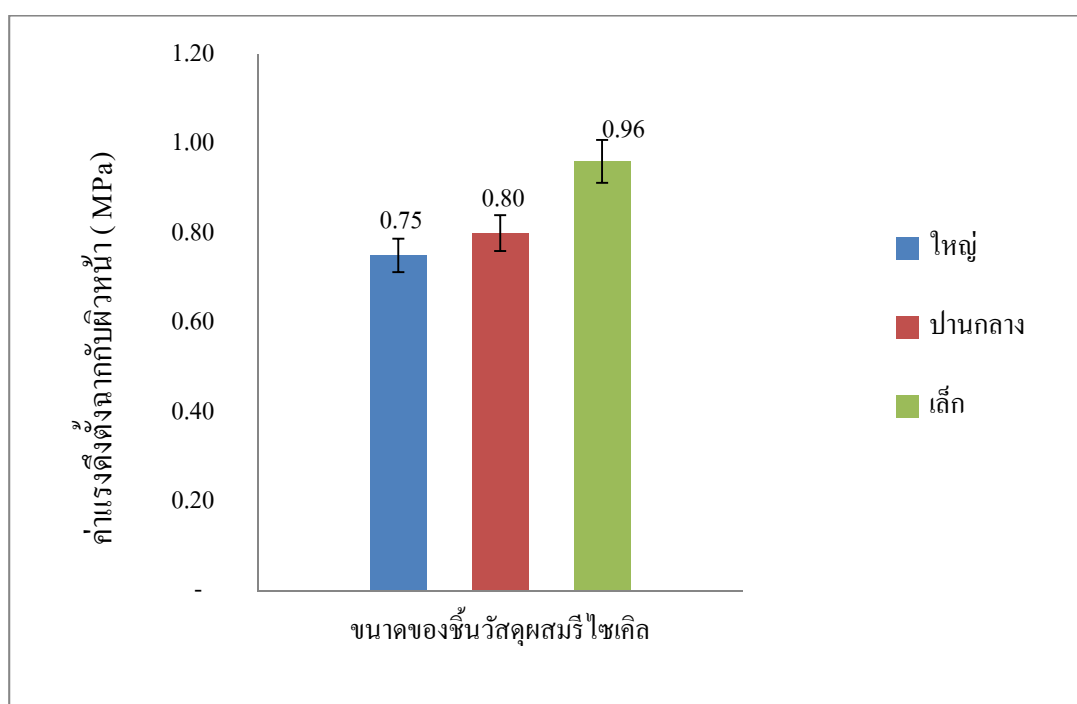
ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ผลการทดสอบ(MPa)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	0.77	0.75	0.75	0.75
ปานกลาง	0.78	0.81	0.80	0.80
เล็ก	0.94	0.97	0.97	0.96

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ	x_i	แทน ผลทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า(MPa)
	n	แทน จำนวนชิ้นทดสอบ
	$\bar{X}$	แทน ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า(MPa)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.77+0.73 +0.75}{3} = 0.75 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นวัสดุผสมขนาดใหญ่ มีค่าเท่ากับ 0.77 MPa



แผนภูมิที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ากับขนาดของวัสดุผสม

4.1.5 การประเมินผลการทดสอบค่าความหนาแน่น

จากการทดลอง นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น เพื่อวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยจะทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 792 ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นจากตารางภาคผนวก ก. 4

ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ผลการทดสอบ (g/cm ³)			
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	1.01	0.95	0.98	0.98
ปานกลาง	0.99	0.96	0.98	0.98
เล็ก	1.00	1.02	1.01	1.01

นำค่าน้ำหนักของชิ้นทดสอบ หาร ด้วยปริมาตรของชิ้นทดสอบ ของชิ้นวัสดุผสมที่มีขนาด ใหญ่ ชิ้นที่ 1 จากตารางภาคผนวก ก. 4 มาคำนวณ จะได้

$$\text{ค่าความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ(กรัม)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ(ลูกบาศก์เซนติเมตร)}} \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\text{ค่าความหนาแน่น} = \frac{22.66}{5 \times 0.8 \times 5} = 1.01 \text{ g/m}^3$$

เพราะฉะนั้น ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม ที่มีขนาดชิ้นใหญ่ ชิ้นที่ 1 มีค่า เท่ากับ 1.01 g/m³ จากนั้น

นำผลทดสอบค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดของวัสดุผสมมา ค่าเฉลี่ยจะได้

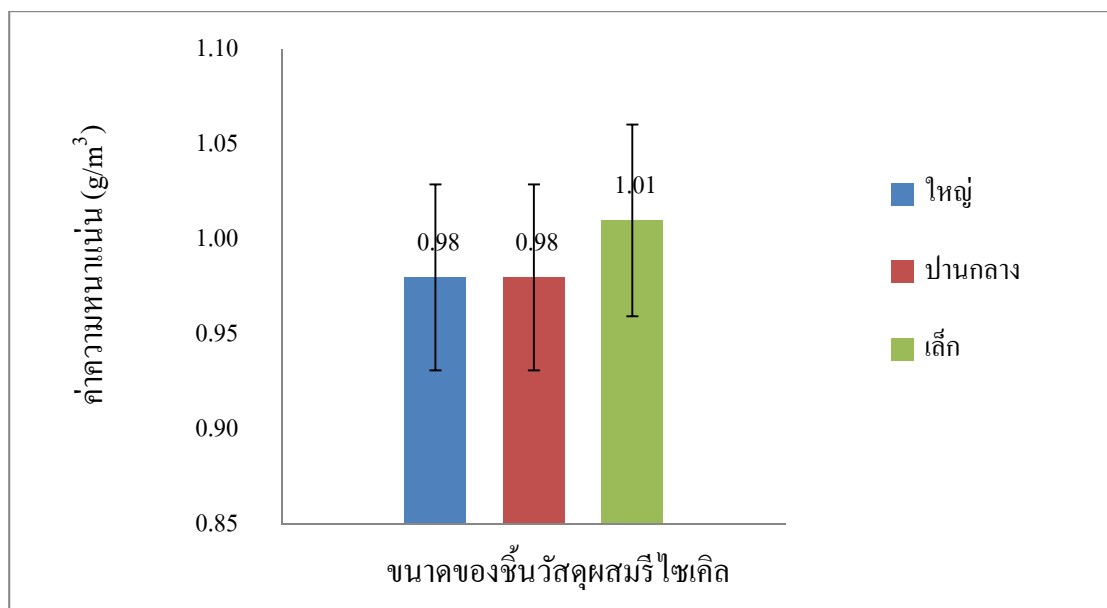
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ x_i แทน ผลทดสอบค่าความหนาแน่น (g/cm³)

n แทน จำนวนชิ้นทดสอบ

$\bar{X}$ แทน ค่าเฉลี่ยผลทดสอบความหนาแน่น (g/cm³)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{1.01 + 0.95 + 0.98}{3} = 0.98 \text{ g/m}^3$$



แผนภูมิที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับขนาดของวัสดุผสม

4.1.6 การประเมินผลทดสอบการพองตัวด้านความหนา

จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบโดยการแช่น้ำ ก่อนการทดสอบจะวัดความหนา ก่อนการแช่น้ำ แล้วจึงนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความหนาภายหลังการแช่น้ำ และทำการคำนวณ โดยจะทำการทดสอบจำนวน 2 ครั้งๆละ 4 ชิ้น รวมชิ้นทดสอบวัสดุผสมละ 8 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 1037 – 99 ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการพองตัวด้านความหนาจากตารางภาคผนวก ก. 5

ขนาดชิ้นวัสดุผสม	ผลการทดสอบ(%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ใหญ่	0.55	0.84	0.70
ปานกลาง	0.76	0.69	0.70
เล็ก	0.52	0.66	0.59

นำค่าความหนา ก่อนแช่น้ำลบกับค่าความหนาหลังแช่น้ำของชิ้นงานแล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วยความหนา ก่อนทำการแช่น้ำของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นที่ 1 จากตารางภาคผนวก ก. 5 มาคำนวณจะได้

$$\text{การพองตัวด้านความหนา (\%)} = \frac{\text{ความหนาหลังแช่น้ำ} - \text{ความหนาก่อนแช่น้ำ}}{\text{ความหนาก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \dots (2.29)$$

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{9.1 - 9.05}{9.05} = 0.55 \%$$

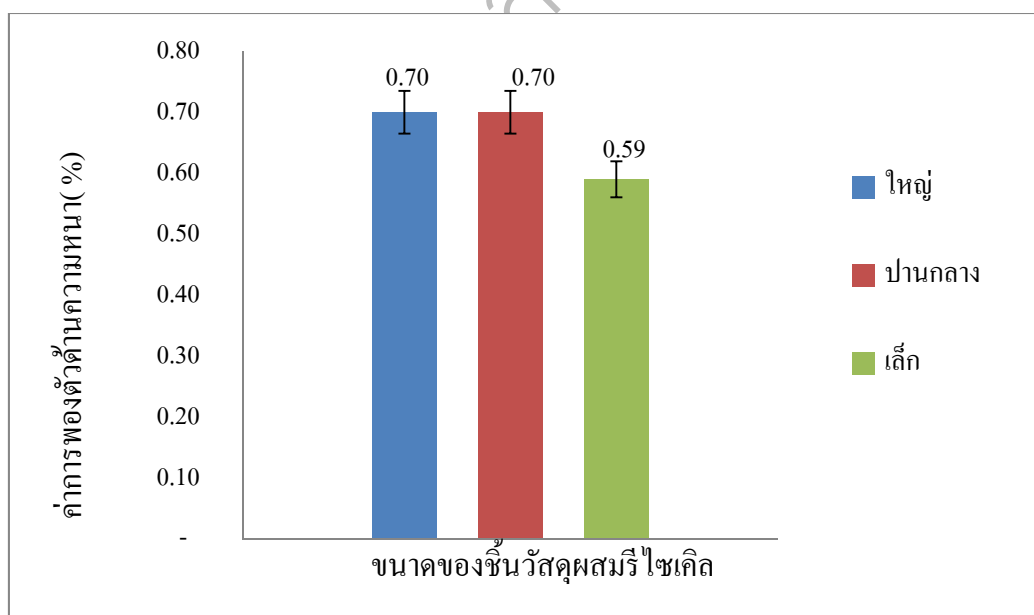
เพราะฉะนั้นค่าการพองตัวด้านความหนาของชิ้นงานวัสดุผสมขนาดใหญ่ ในการทดลองครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.55 %

นำผลทดสอบค่าการพองตัวด้านความหนาที่คำนวณได้ทั้งหมดในแต่ละขนาดอูมิเนียม, k หาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots (2.31)$$

เมื่อ	x_i	แทน ผลทดสอบการพองตัวด้านความหนา(%)
	n	แทน จำนวนครั้งการทดลอง
	$\bar{X}$	แทน ค่าเฉลี่ยของการพองตัวด้านความหนา(%)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0.55 + 0.84}{2} = 0.70 \%$$



แผนภูมิที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการพองตัวด้านความหนากับขนาดของวัสดุผสม

4.1.7 การประเมินผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชนิด ไปทำการทดสอบโดยวิธีการแช่น้ำ โดยก่อนการทดสอบจะวัดน้ำหนักก่อนการแช่น้ำ แล้วจึงนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดน้ำหนักหลังการแช่น้ำ และทำการคำนวณ โดยจะทำการทดสอบ จำนวน 8 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 1037 – 99 ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำจากตารางภาคผนวก ก.6

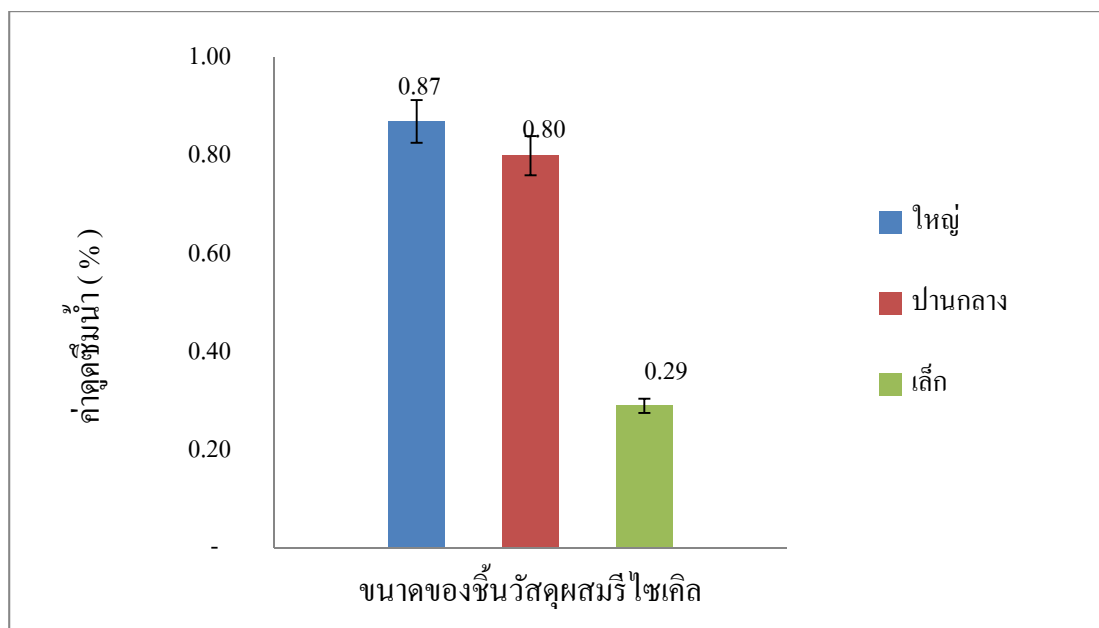
ขนาดชิ้นวัสดุผสม	น้ำหนักเฉลี่ย (g)		การพองตัว(%)
	ก่อน	หลัง	
ใหญ่	22.93	23.00	0.87
ปานกลาง	21.88	22.06	0.80
เล็ก	20.58	20.64	0.29

นำค่าน้ำหนักก่อนการแช่น้ำลบด้วยค่าน้ำหนักหลังการแช่น้ำของชิ้นงาน หาค่าด้วยน้ำหนักก่อนแช่น้ำของชิ้นทดสอบ ใช้ค่าเฉลี่ยจากตารางภาคผนวก ก. 6 มาคำนวณจะได้

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \dots \dots \dots (2.30)$$

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ} = \frac{20.64 - 20.58}{20.58} \times 100 = 0.29 \%$$

เพราะฉะนั้น ค่าการดูดซึมน้ำของทดสอบ ที่มีชิ้นวัสดุผสมขนาดเล็ก จากตารางภาคผนวก ก. 6 มีค่าเท่ากับ 0.29 %



แผนภูมิที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดซึมน้ำกับขนาดของวัสดุผสม

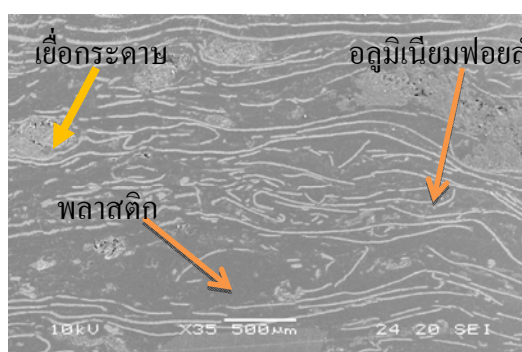
4.1.8 สรุปผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ

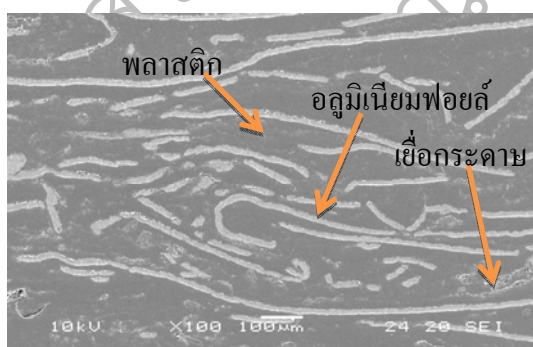
การทดสอบ	หน่วย	ขนาดดลูมิเนียมฟอยล์		
		ใหญ่	ปานกลาง	เล็ก
ค่าความแข็ง	(BHN)	68.63	64.61	61.55
ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (MOR)	(MPa)	19.23	14.23	11.84
ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (MOE)	(MPa)	441.00	337.45	124.04
แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	(MPa)	0.75	0.80	0.96
ค่าความหนาแน่น	(g/m ³)	0.98	0.98	1.01
การพองตัวด้านความหนา	(%)	0.70	0.70	0.59
การดูดซึมน้ำ	(%)	0.87	0.80	0.29

4.1.9 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากการทดลองโดยการนำชิ้นทดสอบ ขนาดใหญ่ ปานกลาง และขนาดเล็ก ไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง SEM โดยใช้กำลังขยายความละเอียดที่ 35 เท่า 100 เท่า และ 200 เท่า ได้ภาพโครงสร้างของชิ้นงานดังนี้

1. พื้นผิวของชิ้นทดสอบจากวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ (60 มม.)



ภาพที่ 4.1 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 35 เท่า

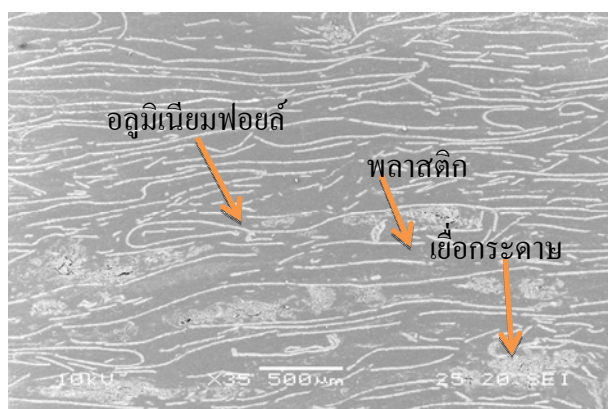


ภาพที่ 4.2 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 100 เท่า

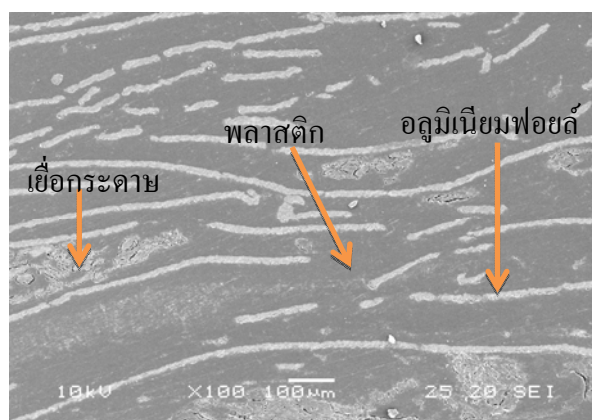


ภาพที่ 4.3 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่ กำลังขยาย 200 เท่า

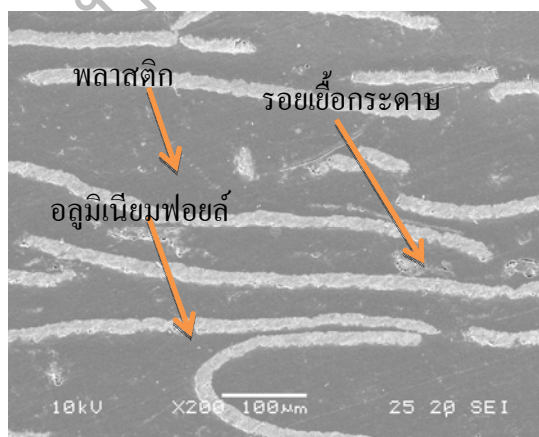
2. พื้นผิวของชิ้นทดสอบจากวัสดุผสมขนาดชิ้นปานกลาง (45 มม.)



ภาพที่ 4.4 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นปานกลาง กำลังขยาย 35 เท่า

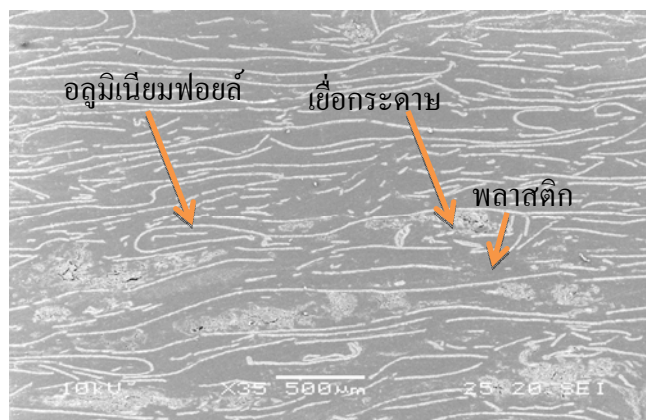


ภาพที่ 4.5 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นปานกลาง กำลังขยาย 100 เท่า

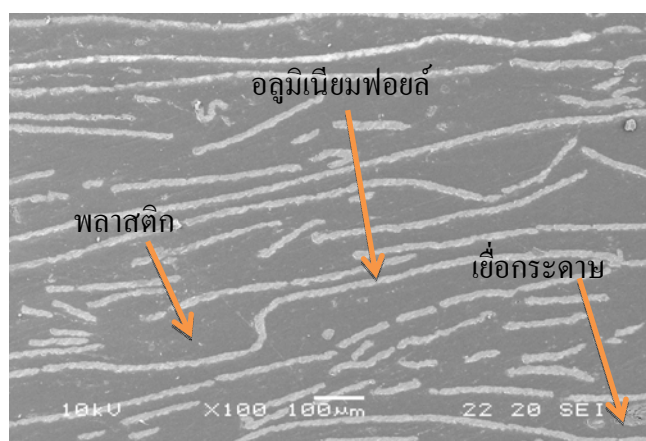


ภาพที่ 4.6 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นปานกลาง กำลังขยาย 200 เท่า

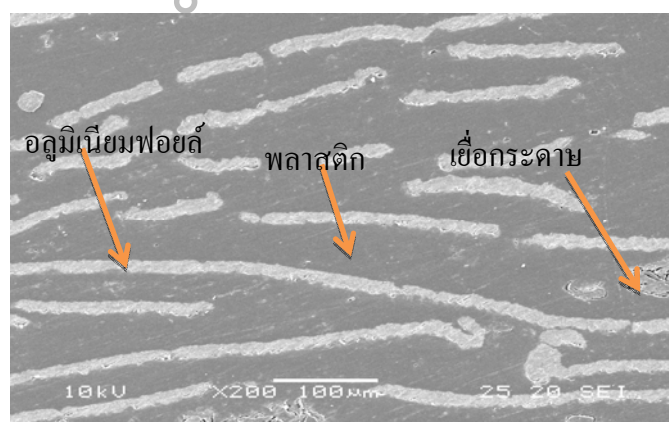
3. พื้นผิวของชิ้นทดสอบจากวัสดุผสมขนาดชิ้นเล็ก (25 มม.)



ภาพที่ 4.7 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นเล็ก กำลังขยาย 35 เท่า



ภาพที่ 4.8 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นเล็ก กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพที่ 4.9 เนื้อวัสดุผสมขนาดชิ้นเล็ก กำลังขยาย 200 เท่า

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสมรีไซเคิล อลูมิเนียมฟอยล์ กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE) จากกล่อง กล่องเครื่องดื่ม UHT เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มุง หลังคาเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงทั้งทางกลและทางกายภาพมากขึ้นและนอกจากนี้แล้ว ยังสามารถ นำวัสดุผสมนี้ไปผลิตเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ ได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการลดการใช้วัตถุดิบใหม่ๆ และช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิต รวมถึงช่วย รักษาสภาพแวดล้อมจากสิ่งที่ไม่ได้ใช้แล้ว จากผลการศึกษาและทดลองสามารถสรุปผลของ โครงการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและทดลองโครงการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ ผสมรีไซเคิลจากกล่อง UHT ที่ร้อนผ่านตะแกรง จำนวน 3 ขนาด คือขนาดใหญ่ ปานกลาง และ ขนาดเล็ก ปรากฏว่า ชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมที่มีชั้นวัสดุผสมขนาดใหญ่ มีสมบัติทางกล คือ ค่า ความแข็งแรง , ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก และค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่นสูง เท่ากับ 68.63 BHN 19.23 MPa และ 441.00 MPa ตามลำดับ แต่จะมีความสามารถในการรับแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า น้อย คือ 0.75 MPa และมีสมบัติทางกายภาพค่อนข้างน้อยกว่า ชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมขนาด ปาน กลางและขนาดเล็ก ซึ่งมีสมบัติ ความหนาแน่น , การพองตัวด้านความหนา , และการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 0.98 g/m³ , 0.70 % และ 0.87 % ตามลำดับ ซึ่งคิดว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่มีชั้นผสมขนาดใหญ่

ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นว่าสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสมรีไซเคิลจาก กล่องนม UHT จะแปรผันไปตามขนาดของชั้นวัสดุในการผสม อาจเนื่องจากชั้นผสมขนาดใหญ่มี ปริมาณของอลูมิเนียมฟอยล์และโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ เป็นชั้นใหญ่ มีการยึดตัวได้สูงจึงทำ ให้มีความแข็งแรงและรับแรงได้สูงกว่าชั้นผสมที่มีขนาดเล็กกว่า แต่เมื่อมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่าง ระหว่างโครงสร้างการเกาะตัวมากกว่า จึงทำให้เกิดการพองตัว การดูดซึมน้ำมากกว่า และทำให้มี ความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีชั้นผสมขนาดเล็ก

ตารางที่ 5.1 สมบัติของแผ่นมุงหลังคา ทำจากวัสดุรีไซเคิล

สมบัติของวัสดุ						
ชิ้นงานทดสอบ	ความแข็งแรง	ความหนาแน่น	แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	Bending	การพองตัว	การดูดซึมน้ำ
ขนาดใหญ่	มาก	น้อย	น้อย	มาก (เหนียว)	มาก	มาก
ปานกลาง	กลาง	น้อย	น้อย	กลาง	มาก	มาก
ขนาดเล็ก	น้อย	มาก	มาก	น้อย (เปราะ)	น้อย	น้อย

ในการศึกษาสมบัติวัสดุมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า วัสดุผสมขนาดชิ้นใหญ่มีสมบัติทางกลดีที่สุด เนื่องจากมีชั้นอูมิเนียมพอยล์ที่มีขนาดใหญ่ทำให้สามารถรับแรงหรือภาระที่มากกว่าชิ้นอูมิเนียมพอยล์ที่มีขนาดเล็ก แต่ในทางกลับกันในการทดสอบทางกายภาพที่อูมิเนียมพอยล์ขนาดเล็ก ทำให้ช่องว่างการเกาะตัวของโครงสร้างมีน้อย จึงทำให้เกิดการเกาะตัวที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ของเหลวไม่สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไประหว่างโครงสร้างของการเกาะตัวได้ จึงเหมาะกับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติด้านกายภาพสูงๆ

5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ

5.2.1 เนื่องจากอูมิเนียมพอยล์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง จึงมีความยากในการตัดแยกขนาดให้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนก่อนที่จะนำมาผลิตเป็นแผ่นมุงหลังคา

5.2.2 เวลาในการอัดรีดในขั้นตอนของกระบวนการผลิตวัสดุมุงหลังคานั้นอาจคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นต้องกำหนดเวลาให้ตรงกันทุกครั้งโดยไม่ให้คลาดเคลื่อน

5.2.3 ต้องระวังในการตัดขนาดของชิ้นงานทดสอบต้องใช้ความละเอียดสูงในการตัดชิ้นงานเพื่อนทดสอบ หากขนาดแตกต่างกันเพียงนิดเดียวค่าของการทดสอบอาจคลาดเคลื่อนได้

5.2.4 ในการทดสอบหาค่า (Modulus of Rupture, MOR) และ (Modulus of Elasticity, MOE) ต้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิก่อนทำการทดสอบโดยหึ่งควบคุมความชื้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาสมบัติทางกระบวนการเช่นดัชนีการไหล การคงรูปภายใต้ความร้อน เป็นต้น

5.3.2 ควรศึกษาวัสดุผสมพอลิเมอร์กับความละเอียดของมิกซ์เจอร์อื่น ๆ เช่น 20 มม. 15 มม. หรือ 10 มม. ในขนาดที่ละเอียดอื่นๆ เพื่อนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ใช้งานต่างๆ

5.3.3 สามารถเลือกใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปอื่นๆ ที่สูงกว่า 180 °C ขึ้นไป

5.3.4 ในกระบวนการอัดแผ่นขึ้นงานควรจะทำให้มีความหนาเท่ากันทุกๆ แผ่น เพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบทางกายภาพ อีกทั้งยังทำให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นด้วย

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บรรณานุกรม

- [1] “พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene (LDPE))”[ระบบออนไลน์].
แหล่งที่มา <http://coursewares.mju.ac.th> (15 กรกฎาคม 2557)
- [2] “คอมโพสิต (Composite)”[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา<http://www.physics.kku.ac.th>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [3] “UHT (Ultra High Temperature)”[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา<http://guru.google.co.th>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [4] “ยอดการผลิตกล่อง UHT”[ระบบออนไลน์]แหล่งที่มา<http://www.set.or.th>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [5] “การผลิตกล่อง UHT”[ระบบออนไลน์]แหล่งที่มา<http://science.srru.ac.th>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [6] จีราภรณ์คำศรี “การศึกษาถึงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)”(15 กรกฎาคม 2557)
- [7] รังสิมา ชลคุปรัตน์า ดันตเทอดธรรม และ สุชาดา อุชชิน “การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของเส้นใยสับปะรดกับพอลิไวนิลอะซิเตด”สถาบันผลิตผลเกษตรฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์(15 กรกฎาคม 2557)
- [8] ปฏิเวช จันทเพชร และ นครศ กงทอง, 2555.“การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมผงแคลบ”,ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ(15 กรกฎาคม 2557)
- [9] สุภัทรา บุตรทองคำและ มุกระวี พรหมศรีชา, 2556.“การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีน”, ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (15 กรกฎาคม 2557)
- [10] “การรีไซเคิล (Recycle)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา<http://yongrecycle.blogspot.com>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [11] “การรีไซเคิลกล่องเครื่องดื่ม”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา<http://www.tcdc.or.th>
(15 กรกฎาคม 2557)
- [12] “กล่องเครื่องดื่ม”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา<http://www.ampolfood.com>
(15 กรกฎาคม 2557)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] เอกกวี เสร้,เดชา นาคจันทร์ และเรืองชัย รักษาติ, 2555.“ศึกษาสมบัติวัสดุผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยและพอลิเมอร์กับอนุภาคเพื่อใช้เป็นวัสดุทำไบกิ้งหั่นลมผลิตภัณฑ์กระแสไฟฟ้า”, ปรินญาณิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ(ศูนย์นนทบุรี) (15กรกฎาคม2557)
- [14] “อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)” [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://www.linearenergy.com> (15กรกฎาคม2557)
- [15] “โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE)” [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://siammetalliczone.com>(15กรกฎาคม2557)
- [16] “โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE)”[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา<http://greeniebag.blogspot.com>(15กรกฎาคม2557)
- [17] A.Brent Strong.,2000 “ Hight Density Polyethylene (HDPE)” ,Plastics Materials and Processing, No.198“พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)”
- [18] “โพลีเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)” [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://siammetalliczone.com!!>
- [19] A.Brent Strong.,2000 “ Hight Density Polyethylene (HDPE)” ,Plastics Materials and Processing, No.198 “ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ”
- [20] “ลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://www.vickerpigment.com>(16กรกฎาคม2557)
- [21] บรรเลง ศรีนิล“การผสม (Mixing)”,เทคโนโลยีพลาสติก ,หน้า 28-30(16กรกฎาคม2557)
- [22] ปฏิเวช จันเพชร และ นครศ กองทอง, 2556.“การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำผสมผงแคลบ”,ปรินญาณิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ(16กรกฎาคม2557)
- [23] “การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ (Polymer Processing)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://epg.science.cmu.ac.th/>(16กรกฎาคม2557)
- [24] ปฏิเวช จันเพชร และ นครศ กองทอง.กระบวนการอัดขึ้นรูป(Extrusion), 2556.“การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำผสมผงแคลบ”,ปรินญาณิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ(16กรกฎาคม2557)

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [25] “การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)” [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://e-book.ram.> (16กรกฎาคม 2557)
- [26] “สเกลการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://e-book.ram.edu>(16กรกฎาคม 2557)
- [27] “แสดงวิธีทดสอบความแข็ง (Hardness)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://www.seem.kmutt.ac.th> (16กรกฎาคม 2557)
- [28] “ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ”
[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา<http://www.seem.kmutt.ac.th>
- [29] “ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (Modulus of Rupture (MOR))”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream> (16 กรกฎาคม 2557)
- [30] Andrew Pytel, 1980.“Strength of Material”, The Maple Press Company, New York
(18 กรกฎาคม 2557)
- [31] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547.“การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(18 กรกฎาคม 2557)
- [32] ปฏิวเร จันเพชรและ นครเศศ กองทอง, 2555.“การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิโอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมผงแคลบ”,ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ(18 กรกฎาคม 2557)
- [33] Andrew Pytel, 1980.“Strength of Material”, The Maple Press Company, New York
(18 กรกฎาคม 2557)
- [34] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547.“การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(18 กรกฎาคม 2557)
- [35] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547.“ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง”,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),กรุงเทพฯ หน้า 32-36 (18 กรกฎาคม 2557)
- [36] “ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity (MOE))”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://www.instron.co.th> (18 กรกฎาคม 2557)
- [37] “การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength, IB)”
[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา<http://www.instron.co.th>(18 กรกฎาคม 2557)

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [38] “การพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling, TS)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://www.reocities.com>(18 กรกฎาคม 2557)
- [39] “การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
[http:// sutir/bitstream.pdf](http://sutir/bitstream.pdf) (18 กรกฎาคม 2557)
- [40] “ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean , Average , $\bar{X}$)”[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา
<http://pibul2.psu.ac.th>(18 กรกฎาคม 2557)

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบ

- การทดสอบความแข็ง (Hardness)
- การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก Modulus of Rupture (MOR)
- การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น Modulus of Elasticity (MOE)
- การทดสอบความต้านทานแรงดึงตึงภายใน (Internal Bonding)
- การทดสอบความหนาแน่น (Density)
- การทดสอบการพองตัวด้านความหนา (Thickness Swelling)
- การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- ตารางการทดสอบ วัสดุผสมขนาดต่างๆ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

ภาคผนวก ข.

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

- Density มาตรฐาน ASTM D 792-00
- Hardness มาตรฐาน ASTM D 785
- Thickness Swelling มาตรฐาน ASTM D 792-13
- Modulus of Rupture (MOR) มาตรฐาน ASTM D 143-14
- Modulus of Elasticity (MOE) มาตรฐาน ASTM D 790-10
- Water Absorption มาตรฐาน ASTM 1037-99
- Internal Bonding มาตรฐาน ASTM D 638

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

สวพ.
นทร.สุวรรณภูมิ

ภาคผนวก ค.

ขั้นตอนการผลิตวัสดุพิมพ์

สารพิมพ์
ม.ท.ร.สารพิมพ์

1. ขั้นตอนการผลิตวัสดุผนังหลังคา

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
1.เตรียมอลูมิเนียมฟอยล์ 	นำอลูมิเนียมฟอยล์เนื้อหยาบ มาเข้าในแบบอัดร้อนของเครื่องนั้นๆ ภายในเครื่องอัดร้อนสามารถอัดได้ครั้งละหลายๆ ล็อกได้ แต่ครั้งนี้ จะเตรียมไว้ 10 แผ่น
2.คลุมพลาสติก 	นำพลาสติกPolyethylene terephthalate (PET) / พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคลุมบนผิวด้านหน้า เพื่อไม่ให้อลูมิเนียมฟอยล์ปลิวออกจากบล็อกอัดงาน
3.ทำการอัดเป็นแผ่น 	นำงานที่เตรียมไว้ทั้ง 10 แผ่น เข้าเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4.ขึ้นลอนและตัดให้ได้ขนาด 	เมื่อนำออกจากเครื่องอัดร้อนแล้ว อย่าปล่อยให้เย็นนาน ทำการคัดลอนแล้วจึงทำการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน
5.ผลิตภัณฑ์ผนังหลังคา 	จะได้เป็นผลิตภัณฑ์ผนังหลังคาแผ่นลอน ขนาดกว้าง 90 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร ราคาผลิตภัณฑ์ 380 บาท/แผ่น น้ำหนักต่อแผ่น 14 kg. เมื่อเทียบกับแผ่นกระเบื้องผนังหลังคาขนาดมาตรฐาน 1.20 m. จะมีน้ำหนัก 3.50 kg.

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
	นอกจากจะผลิตเป็นลังกาได้แล้วยังสามารถนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ กระดาษถนอมสายตา เรือ เป็นต้น

ข้อมูลการรีไซเคิลกล่องนม จากบริษัท ไฟเบอร์ พัฒน์ จำกัด
 ที่อยู่ 30/11 หมู่ 11 ซอยวัดเสาธงกลาง บางนา-ตราด ตำบลบางเสาธง อำเภอบางเสาธง
 สมุทรปราการ 10540

โทรศัพท์ 0-2397-9453-5

โทรสาร 0-2397-9451

อีเมล fiberpattana9@hotmail.com

เวลาทำการ จันทร์-ศุกร์ เวลา 08:30-17:00, เสาร์ เวลา 08:30-17:00