

## การศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน

### A Study on the Mechanical Properties of Recycled HDPE and Durian Peel Fiber Boards

สโรชา เจริญวัย\*

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110  
\*ติดต่อ: E-mail: sarochakuk@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 089-117-0898

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิลจากขวดน้ำพลาสติกและเส้นใยจากเปลือกทุเรียน โดยทำการผลิตแผ่นอัดจากการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20% ผสมกับวัสดุรีไซเคิลเม็ดพลาสติก HDPE (High Density Polyethylene) จากขวดน้ำดื่มพลาสติกตามกระบวนการอัดรีดโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) และทำการเตรียมวัสดุผสมตามกระบวนการอัดรีดโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) และขึ้นรูปแผ่นอัดด้วยการม้วนรีดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 °C หลังจากการผลิตทำการศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน อาทิ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

**คำหลัก:** พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง; วัสดุรีไซเคิล; เส้นใยเปลือกทุเรียน; สมบัติทางกล; กระบวนการอัดรีด

#### Abstract

In this study, durian peel fibers and polymer of high density polyethylene (HDPE) was employed as matrix into composites, which were produced from several durian peel fiber contents (5%, 10%, 15% and 20 %, respectively). Composites of High Density Polyethylene (HDPE) and durian peel fiber were prepared by successive twin screw extrusion blending. Then, hot pressing is employed at different compression temperatures of 170, 180, 190 and 200°C for forming composite. The mechanical properties of the composites; elasticity modulus, tensile strength, impact strength, hardness and modulus of elasticity were investigated.

**Keywords:** High Density Polyethylene (HDPE); Recycled; Durian Peel Fiber; Mechanical Properties; Hot Pressing

## AMM-277

### 1. บทนำ

จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรสูงในแต่ละปี เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตทุเรียน พบว่ามีแนวโน้มที่มีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเป็นที่นิยมของผู้บริโภค (www.dft.moc.go.th) จึงส่งผลให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จำพวกเปลือกทุเรียนมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 กองขยะเปลือกทุเรียนที่ตลาดไท รังสิต



รูปที่ 1 กองขยะเปลือกทุเรียนที่ตลาดไท รังสิต [1]

ดังนั้นถ้าไม่สามารถกำจัดขยะเหล่านี้ได้จะส่งผลทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยได้มีคณะนักวิจัยที่ทำการวิจัยนำเส้นใยจากเปลือกทุเรียน [1-9] มาผลิตเป็นวัสดุต่างๆ โดยพบว่าแผ่นขึ้นไม้อัดที่ผลิตจากเส้นใยทุเรียนมีค่าสัมประสิทธิ์การความร้อนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจากเส้นใยทุเรียนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ต่ำ เท่ากับ  $0.0921 \text{ W/m.K}$  เมื่อเทียบกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ

นอกจากขยะจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแล้ว ขยะจากพลาสติกยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการเพิ่มมูลค่า ทั้งนี้ในปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีบทบาทในชีวิตประจำวัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และนำมาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ อาทิ ไม้ และเหล็ก เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก

น้ำหนักเบา และมีการประยุกต์ใช้งานหลากหลาย โดยพลาสติกทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ [11]

ก. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่อ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกประเภทนี้ สามารถนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

ข. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เป็นพลาสติกที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อนำไปขึ้นรูปพลาสติก จะไม่สามารถนำไปหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้ ได้แก่ พอลิยูเรเทน (PUR) อีพอกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolic) เมลามีน (Melamine)

โดยขยะที่เกิดจากพลาสติกที่ใช้แล้วมีปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 2 ขวดน้ำดื่มพลาสติก HDPE (High Density Polyethylene) ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลสร้างมูลค่าได้ โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิโอเลฟิน และมีโครงสร้างเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีความเป็นเส้นตรงค่อนข้างสูง มีกิ่งก้านสาขาแยกออกมาเป็นสั้นๆ เล็กน้อยหรือแทบจะไม่มี จึงทำให้โครงสร้างมีการเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ มีความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่น  $0.94\text{--}0.965 \text{ g/cm}^3$  มีความแข็งตึง ความเหนียว ความทนแรงดึง ความแข็งทนทานต่อความร้อนและสารเคมี มากกว่า LDPE เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีจุดหลอมเหลวประมาณ  $135^\circ\text{C}$  และจุดอ่อนตัวประมาณ  $125^\circ\text{C}$

ดังนั้นที่ผ่านมามีคณะผู้วิจัยต่างๆจึงมีความสนใจที่ดำเนินการวิจัยในการนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมในวัสดุรีไซเคิล HDPE เพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [10-15] จากเส้นใยธรรมชาติ อาทิ ชานอ้อย, ต้นอ้อ, ต้นกก และเมล็ดถั่วลิสง

## AMM-277



รูปที่ 2 ขวดน้ำดื่มพลาสติก HDPE  
(ที่มา: วงศ์พานิชย์)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการผลิตแผ่นอัดจากการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20% ผสมกับวัสดุรีไซเคิลเม็ดพลาสติก HDPE (High Density Polyethylene) ด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ที่ 170, 180, 190 และ 200 °C และทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นอัดดังกล่าว อาทิ ค่าความยืดหยุ่น ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็ง เพื่อศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนเส้นใยเปลือกทุเรียน และอุณหภูมิในการอัดที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแผ่นอัดดังกล่าว

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียน

ในการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียนแสดงดังรูปที่ 3 โดยนำเปลือกทุเรียนสดมาทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบดเปลือกทุเรียนแห้งด้วยเครื่องบดและคัดขนาดเส้นใยเปลือกทุเรียน



รูปที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียน

### 2.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเส้นใยเปลือกทุเรียน และ เม็ดพลาสติก Recycled HDPE และกระบวนการอัดร้อน

สำหรับขั้นตอนในการเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเส้นใยเปลือกทุเรียน และเม็ดพลาสติก Recycled HDPE สามารถดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบก่อนนำไปผสมโดยทำการชั่งวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ โดยมีเปอร์เซ็นต์เส้นใยเปลือกทุเรียนที่ 0% (Pure Recycled HDPE), 5%, 10%, 15% และ 20% โดยทำการการผลิตแผ่นอัดหนึ่งแผ่นจะกำหนดน้ำหนักเท่ากับ 1,000 กรัมต่อหนึ่งแผ่น ดังนั้นในการชั่งน้ำหนักเพื่อทำการผลิตแผ่นอัดที่อัตราส่วนต่างๆ อาทิ การผลิตที่มีเส้นใยทุเรียน 10% จะชั่งน้ำหนักเส้นใยเปลือกทุเรียน เท่ากับ 100 กรัม และชั่งน้ำหนักเม็ดพลาสติกเท่ากับ 900 กรัม โดยความยาวเส้นใยเปลือกทุเรียน ขนาดไม่เกิน 500 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่

## AMM-277

เหมาะสำหรับการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

2. จากนั้นนำวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด มาผสมด้วยเครื่อง Speed mix เติมน้ำมันผสม (Paraffin Oil) เพื่อช่วยในการผสมให้เข้ากันได้ดีขึ้น

3. จากนั้นใส่ลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) เพื่อให้พลาสติกมีการหลอมตัวเข้าไปหุ้มเส้นใยเปลือกทุเรียนและกระจายตัวเข้ากัน หลังจากนั้นสกรูจะดันพลาสติกออกมาจากตาย และทำการดึงออกมาเป็นเส้น

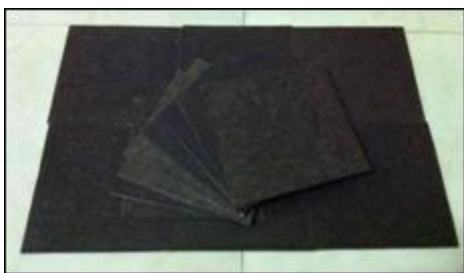
4. นำไปเข้าเครื่องตัด ตัดเป็นเม็ดก่อนโดยใช้ความเร็วรอบในการตัด 50 rpm

5. นำเม็ดที่ตัดได้ไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกันที่ 170, 180, 190 และ 200 °C

โดยได้แผ่นอัดดังแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4 แสดงแผ่นที่ใช้วัสดุรีไซเคิลจากขวดพลาสติก HDPE 100% (เส้นใยเปลือกทุเรียน 0%) และรูปที่ 5 แสดงแผ่นอัดที่ขึ้นรูปจากวัสดุรีไซเคิลขวดพลาสติก HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน



รูปที่ 4 แผ่น Pure Recycled HDPE  
(ปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน 0%)



รูปที่ 5 แผ่นอัดเส้นใยเปลือกทุเรียน

และ Recycled HDPE

### 3 การทดสอบสมบัติทางกล [13]

#### 3.1 การทดสอบเรื่องการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) มาตรฐาน ASTM D 638

หลักการการทดสอบนี้เป็นการหาค่าความทนต่อแรงดึงของชิ้นงานพลาสติก HDPE กับเส้นใยเปลือกทุเรียนที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน และค่าการยืดตัวหลังจากที่ผสมในอัตราส่วนต่างกัน การทดสอบนี้จะเป็นการบ่งบอกถึงความแข็งแรงของพลาสติกที่สามารถทนต่อแรงดึงหรือมีความยืดหยุ่น ภายใต้น้ำหนักที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสั้นๆ โดยใช้เครื่องทดสอบ (Universal Instron Test) ที่สามารถคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นด้วย



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบค่าการทนต่อแรงดึง

#### 3.2 การทดสอบเรื่องการทนต่อแรงกระแทกโดยวิธี Izod มาตรฐาน ASTM D 256

หลักการ การทดสอบนี้เป็นการหาค่าการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานพลาสติก HDPE กับเส้นใยเปลือกทุเรียนที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน โดยสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุโพลีเมอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียวของวัสดุ ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟ stress - strain curve ก็เป็นค่าความเหนียวโดยตรงของวัสดุ ถ้าค่าทนแรงกระแทกต่ำกว่าค่าความเหนียวก็จะน้อย

## AMM-277



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบค่าทนต่อแรงกระแทก

### 3.3 การทดสอบความแข็งที่ผิวของพลาสติก

หลักการ การทดสอบความแข็งที่ผิวแบบนี้ นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะเป็นวิธีทดสอบที่ทำได้รวดเร็ว เนื่องจากสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทดสอบวัสดุชิ้นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่าและแข็งกว่าได้ การทดสอบความแข็งรีดคเวลล์นี้สามารถทดสอบโลหะทั้งแข็งและ อ่อนได้ เพราะมีสเกลความแข็งรีดคเวลล์ให้เลือกได้หลายสเกลแต่ละสเกลก็เหมาะกับวัสดุแต่ละชนิด โดยใช้หัวกดและขนาดของแรงกดต่างกัน



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Type)

โดยได้ดำเนินการขึ้นรูปแผ่นอัดในการทดสอบสมบัติทางกล ค่าการทนต่อแรงดึง ค่าทนต่อแรงกระแทก และค่าความแข็ง โดยจะทำการทดสอบโดยขึ้นรูปทำซ้ำ 10 ชิ้น ตามมาตรฐานการทดสอบ

## 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการผลิตแผ่นอัดจากการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20% ผสมกับวัสดุรีไซเคิลเม็ดพลาสติก HDPE (High Density Polyethylene) ด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกัน ที่ 170, 180, 190 และ 200 °C และทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นอัดดังกล่าว ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนเส้นใยเปลือกทุเรียน และอุณหภูมิในการอัดที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิลขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน

โดยพบว่าค่าสมบัติทางกลสำหรับแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิลจากขวดน้ำดื่ม HDPE 100% (ปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน 0%) มีค่าสมบัติทางกลต่างๆ สูงกว่าแผ่นอัดที่ผสมกันระหว่างวัสดุรีไซเคิลจากขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน เนื่องจากเส้นใยเปลือกทุเรียนก่อให้เกิดช่องว่างระหว่าง HDPE เมทริกซ์กับเส้นใยเปลือกทุเรียนจึงส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลที่ลดลง อย่างไรก็ตามแผ่นอัดที่ผสมระหว่างวัสดุรีไซเคิลจากขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียนก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่จะช่วยลดขยะและเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

### 4.1 ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

ค่าการต้านทานแรงดึงหรือค่าทนต่อแรงดึงของแผ่นแสดงดังตารางที่ 1 โดยพบว่าค่าทนต่อแรงดึงของแผ่นอัดที่ใช้เส้นใยเปลือกทุเรียน 10% ให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียน 10% และทำการอัดที่อุณหภูมิ 180 °C จะมีค่าการต้านทานแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ  $20.243 \pm 1.1729$

ตารางที่ 1 ค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

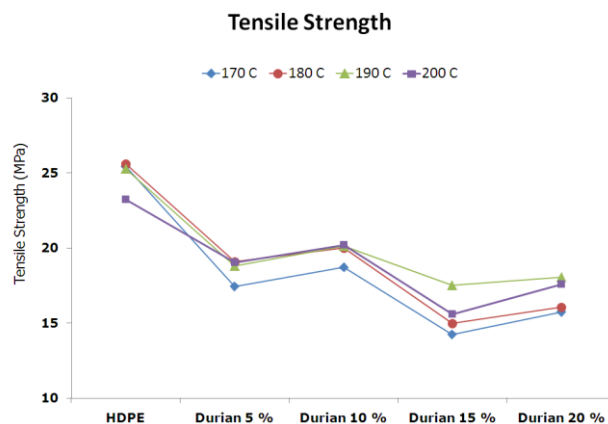
| สภาวะการ | อุณหภูมิ (°C) | ปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน | ค่าการทนต่อแรงดึง |
|----------|---------------|---------------------------|-------------------|
|----------|---------------|---------------------------|-------------------|



## AMM-277

| ผลิต |     | (%) | (MPa)           |
|------|-----|-----|-----------------|
| 1    | 170 | 0   | 25.447 ± 0.9911 |
|      |     | 5   | 17.457 ± 0.6735 |
|      |     | 10  | 18.747 ± 0.9108 |
|      |     | 15  | 14.240 ± 0.9197 |
|      |     | 20  | 15.752 ± 1.0168 |
| 2    | 180 | 0   | 25.623 ± 1.3971 |
|      |     | 5   | 19.122 ± 0.9238 |
|      |     | 10  | 20.243 ± 0.7734 |
|      |     | 15  | 14.988 ± 0.3560 |
|      |     | 20  | 16.097 ± 0.5743 |
| 3    | 190 | 0   | 25.308 ± 1.0900 |
|      |     | 5   | 18.793 ± 1.0384 |
|      |     | 10  | 20.156 ± 0.9024 |
|      |     | 15  | 17.522 ± 1.0961 |
|      |     | 20  | 18.058 ± 0.5617 |
| 4    | 200 | 0   | 23.251 ± 1.0882 |
|      |     | 5   | 19.075 ± 1.4525 |
|      |     | 10  | 20.028 ± 1.1729 |
|      |     | 15  | 15.626 ± 1.0071 |
|      |     | 20  | 17.591 ± 0.9135 |

|   |     | ทุเรียน (%) |                   |
|---|-----|-------------|-------------------|
| 1 | 170 | 0           | 205.670 ± 30.1578 |
|   |     | 5           | 117.272 ± 15.5727 |
|   |     | 10          | 102.848 ± 12.1918 |
|   |     | 15          | 91.944 ± 14.0515  |
|   |     | 20          | 98.000 ± 13.4706  |
| 2 | 180 | 0           | 200.893 ± 42.2922 |
|   |     | 5           | 103.782 ± 7.8118  |
|   |     | 10          | 100.775 ± 10.2366 |
|   |     | 15          | 104.477 ± 9.3816  |
|   |     | 20          | 92.584 ± 7.9553   |
| 3 | 190 | 0           | 207.910 ± 26.7054 |
|   |     | 5           | 110.009 ± 11.5675 |
|   |     | 10          | 96.475 ± 10.4826  |
|   |     | 15          | 87.741 ± 6.5942   |
|   |     | 20          | 79.440 ± 7.8056   |
| 4 | 200 | 0           | 158.948 ± 23.6114 |
|   |     | 5           | 93.477 ± 13.0906  |
|   |     | 10          | 86.383 ± 16.9872  |
|   |     | 15          | 80.689 ± 5.4409   |
|   |     | 20          | 78.884 ± 9.3828   |



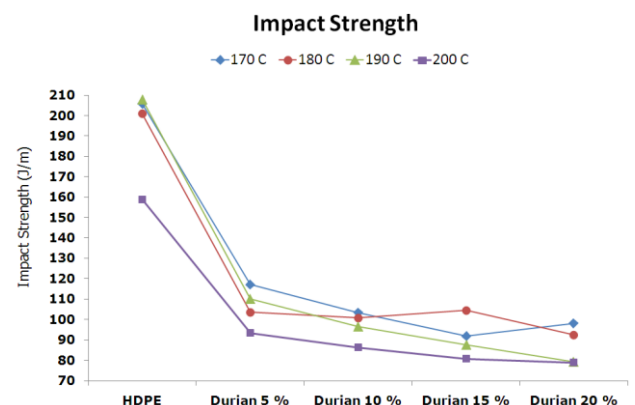
รูปที่ 9 ค่าทนต่อแรงดึงของแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียนและเม็ดพลาสติกกรีซเคลจากขวดพลาสติกที่อัตราส่วนต่างๆ [19]

### 4.2 ค่าทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

ค่าทนแรงต่อแรงกระแทกแสดงดังตารางที่ 2  
ตารางที่ 2 ค่าทนต่อแรงกระแทก

| สภาวะการผลิต | อุณหภูมิ (°C) | ปริมาณเส้นใยเปลือก | ค่าการทนต่อแรงกระแทก (J/m) |
|--------------|---------------|--------------------|----------------------------|
|--------------|---------------|--------------------|----------------------------|

ค่าการทนต่อแรงกระแทกของแผ่นอัดจากวัสดุกรีซเคลจากขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียนแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 10 โดยพบว่าค่าทนต่อแรงกระแทกของแผ่นอัดที่ใช้เส้นใยเปลือกทุเรียนในอัตราส่วน 5% ให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียน 5% และทำการอัดที่อุณหภูมิ 170 °C จะมีค่าการทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 117.272 ± 15.5727 J/m



## AMM-277

รูปที่ 10 ค่าทนต่อแรงกระแทกของแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียนและเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากขวดพลาสติกที่อัตราส่วนต่างๆ [19]

ซึ่งสมบัติทนต่อแรงกระแทกของวัสดุโพลีเมอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียวของวัสดุ ดังนั้นแผ่นอัดที่มีการเติมเส้นใยเปลือกทุเรียนในอัตราส่วนที่ต่ำที่สุดคือ 5% จึงส่งผลต่อความเหนียวของวัสดุมากที่สุด ค่าทนต่อแรงกระแทกจึงสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [14,15] เนื่องจากอิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติที่มีสมบัติเปราะจึงส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของ HDPE ลดลงจึงทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของแผ่นอัดวัสดุผสม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียนลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียนเพิ่มสูงขึ้น

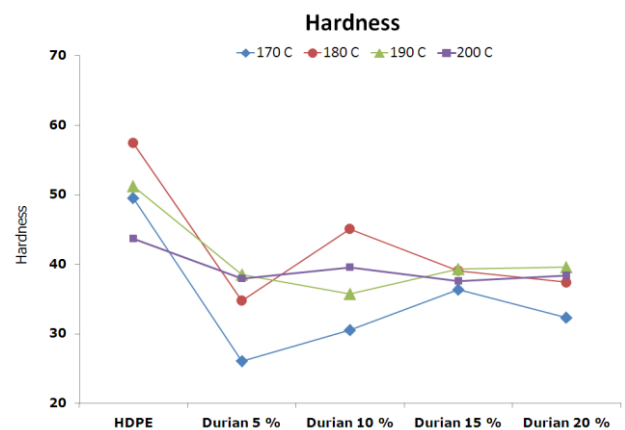
### 4.3 ค่าความแข็งที่ผิว

ค่าความแข็งที่ผิวแผ่นอัดแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 11 โดยพบว่าค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นอัดที่ใช้เส้นใยเปลือกทุเรียน 10% ให้ค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นอัดสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียน 10% และทำการอัดที่อุณหภูมิ 180 °C จะมีค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นอัดเท่ากับ  $45.07 \pm 1.5783$  HRR

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งที่ผิว

| สภาวะการผลิต | อุณหภูมิ (°C) | ปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน (%) | ค่าความแข็งที่ผิว (HRR) |
|--------------|---------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1            | 170           | 0                             | $49.52 \pm 4.3667$      |
|              |               | 5                             | $26.06 \pm 4.0420$      |
|              |               | 10                            | $30.51 \pm 4.7994$      |
|              |               | 15                            | $36.31 \pm 3.3127$      |
|              |               | 20                            | $32.33 \pm 2.7876$      |
| 2            | 180           | 0                             | $57.38 \pm 3.2502$      |
|              |               | 5                             | $34.69 \pm 3.7966$      |
|              |               | 10                            | $45.07 \pm 1.5783$      |

|   |     |    |                    |
|---|-----|----|--------------------|
| 3 | 190 | 15 | $38.98 \pm 4.0118$ |
|   |     | 20 | $37.40 \pm 3.2758$ |
|   |     | 0  | $51.25 \pm 4.9742$ |
|   |     | 5  | $38.45 \pm 5.8067$ |
|   |     | 10 | $35.75 \pm 4.3505$ |
|   |     | 15 | $39.25 \pm 3.6087$ |
| 4 | 200 | 20 | $39.54 \pm 5.9001$ |
|   |     | 0  | $43.72 \pm 6.2827$ |
|   |     | 5  | $37.95 \pm 4.1886$ |
|   |     | 10 | $39.53 \pm 3.3941$ |
|   |     | 15 | $37.62 \pm 3.0626$ |
|   |     | 20 | $38.38 \pm 5.4155$ |



รูปที่ 11 ค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียนและเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากขวดพลาสติกที่อัตราส่วนต่างๆ [19]

### 4.4 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นอัดแสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 12

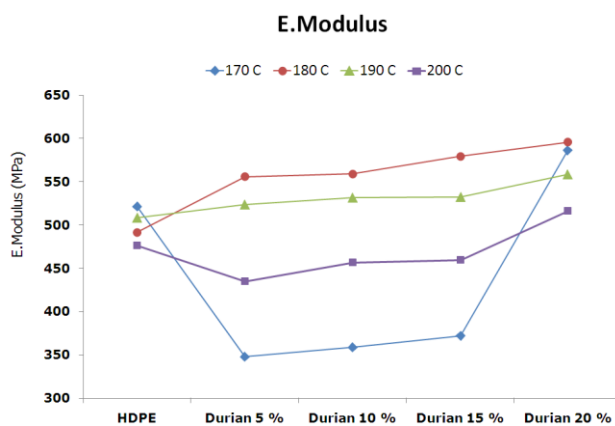
ตารางที่ 4 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

| สภาวะการผลิต | อุณหภูมิ (°C) | ปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน (%) | ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) |
|--------------|---------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1            | 170           | 0                             | $522.000 \pm 36.1109$    |
|              |               | 5                             | $348.437 \pm 17.5456$    |
|              |               | 10                            | $359.287 \pm 23.9119$    |
|              |               | 15                            | $372.375 \pm 67.8383$    |
|              |               | 20                            | $586.500 \pm 72.1803$    |
|              |               | 0                             | $492.012 \pm 66.5121$    |

## AMM-277

|   |     |    |                   |
|---|-----|----|-------------------|
| 2 | 180 | 5  | 555.625 ± 37.0479 |
|   |     | 10 | 559.375 ± 66.0647 |
|   |     | 15 | 579.625 ± 23.2989 |
|   |     | 20 | 595.625 ± 45.4436 |
| 3 | 190 | 0  | 508.250 ± 70.8837 |
|   |     | 5  | 523.500 ± 57.6417 |
|   |     | 10 | 531.500 ± 27.7076 |
|   |     | 15 | 532.875 ± 45.7553 |
|   |     | 20 | 558.750 ± 43.3581 |
| 4 | 200 | 0  | 476.963 ± 61.5819 |
|   |     | 5  | 435.325 ± 32.3845 |
|   |     | 10 | 457.375 ± 26.1909 |
|   |     | 15 | 460.037 ± 43.6788 |
|   |     | 20 | 516.250 ± 68.4079 |

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิลจากขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียนแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 10 โดยพบว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นอัดที่ใช้เส้นใยเปลือกทุเรียนในอัตราส่วน 20% ให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียน 20% และทำการอัดที่อุณหภูมิ 180 °C จะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 595.625 ± 45.4436 MPa



รูปที่ 12 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นอัดที่มีส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียนและเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลจากขวดพลาสติกที่อัตราส่วนต่างๆ [19]

### 5. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้ทำการผลิตแผ่นอัดจากการเตรียมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 5, 10,

15 และ 20% ผสมกับวัสดุรีไซเคิลเม็ดพลาสติก HDPE (High Density Polyethylene) จากขวดน้ำดื่มพลาสติกตามกระบวนการอัดรีดโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) โดยเตรียมวัสดุผสมตามกระบวนการอัดรีดโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) และขึ้นรูปแผ่นอัดด้วยกรรมวิธีกระบวนการอัดรีดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 °C พบว่าสมบัติทางกลของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล HDPE และเส้นใยเปลือกทุเรียน อาทิ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่อัตราส่วนเส้นใยเปลือกทุเรียนที่ 10% อัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C มีค่าสมบัติทางกลที่ดีที่สุด

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพทางกลของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ จากเส้นใยเปลือกทุเรียน กากกาแฟ และชานอ้อย ดังแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพทางกลของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยเปลือกทุเรียน กากกาแฟ และชานอ้อย

| แผ่นอัดผสมระหว่าง rHDPE และเส้นใยธรรมชาติ     | ค่าทนต่อแรงกระแทก (J/m) | ค่าการทนต่อแรงดึง (MPa) | ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) | ค่าความแข็งที่ผิว (HRR) |
|-----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| เส้นใยเปลือกทุเรียน (10%)                     | 100.78                  | 20.03                   | 359.287                  | 45.07                   |
| กากกาแฟ (10%)<br>ชานกร<br>วิรุฬห์มงคล และ คณะ | 80.00                   | 23.00                   | -                        | 60                      |



## AMM-277

|                                                        |   |      |         |   |
|--------------------------------------------------------|---|------|---------|---|
| [16]                                                   |   |      |         |   |
| ชานอ้อย<br>(10%)<br>Mulinari R.<br>D.<br>et al<br>[17] | - | 14.4 | 880.100 | - |

จากการศึกษานำเส้นใยจากเปลือกทุเรียน ขนาดไม่เกิน 500  $\mu\text{m}$  มาผลิตขึ้นรูปเป็นแผ่นอัด ร่วมกับขี้เถ้าเซลลูโลสจากขี้เถ้าต้ม rHDPE ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก โดยทำการขึ้นรูปแผ่นอัดจากกระบวนการผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เครื่องตัดเม็ดพลาสติก และเครื่องอัดร้อนตามลำดับ พบว่าแผ่นอัดที่ผลิตที่อุณหภูมิการอัดร้อน 180 °C โดยมีปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียน 10% มีค่าสมบัติทางกายภาพทางกลและทางความร้อนที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) เท่ากับ 20.028 MPa, ค่าทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) เท่ากับ 100.775 J/m, ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เท่ากับ 359.287 MPa, ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) เท่ากับ 45.07 HRR, ค่าการบวมพองเมื่อแช่น้ำ (Thickness Swelling) เท่ากับ 3.33% และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.077 W/m.K แสดงดังตารางที่ 5

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติต่างๆ ระหว่างแผ่นอัดจาก rHEPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียน เปรียบเทียบกับแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล rHDPE ร่วมกับกากกาแฟ พบว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยเปลือกทุเรียน มีค่าทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ที่สูงกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับกากกาแฟ (ค่าทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 80 J/m) โดยค่าทนต่อแรงกระแทกนั้นคือ ค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกที่หนักหน่วงเฉียบพลันของวัสดุ โดยสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุโพลิเมอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียวของวัสดุ ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟของ Stress-Strain

Curve คือค่าความเหนียวโดยตรงของวัสดุ ถ้าค่าทนต่อแรงกระแทกต่ำ ค่าความเหนียวก็น้อย

การที่สมบัติเชิงกลค่าทนต่อแรงกระแทกของแผ่นอัดจาก rHEPE ร่วมกับกากกาแฟ มีค่าต่ำกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่มีค่าเฮมิเซลลูโลสที่สูงมากถึง 37.33% ในขณะที่เส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีค่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพียง 5.12% ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) คือโมเลกุลรวมของโพลีแซคคาไรด์ น้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไซแลน (Xylans) และกลูโคแมนแนน (Glucmannans) ที่มีโมเลกุลข้างเคียง (Branched Chain) เป็นโมเลกุลที่แตกต่างจากโมเลกุลยาวเดิม เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลรวมของน้ำตาลหลายชนิดมีโครงสร้างซับซ้อน และเป็นผลึกมากกว่าเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะส่งผลโดยตรงต่อความยืดหยุ่น (Relatively Flexible) ของเส้นใย และการกระจายแรงเค้นภายใน (Internal Stress Redistribution) [18] ดังนั้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลค่าทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่า เนื่องจากเมื่อกากกาแฟมีค่าเฮมิเซลลูโลสที่สูงมาก เมื่อแผ่นอัดจาก rHDPE กับกากกาแฟได้รับแรงจะมีการเปลี่ยนขนาดหรือความเครียด (Strain) ในส่วนของเส้นใยกากกาแฟเกิดน้อยกว่าเกิดในพอลิเมอร์เมตริก ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคหรืออินเทอร์เฟซ (Interfaces) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก หรือเสียหาย ดังนั้นจึงส่งผลถึงความไม่ต่อเนื่องของวัฏภาคเมตริกซ์มีรอยต่อของวัฏภาคหรืออินเทอร์เฟซไม่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ค่าทนต่อแรงกระแทกที่ลดลง

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกทุเรียนแห้ง [1] กากกาแฟ [20] และชานอ้อย [21]

## AMM-277

| องค์ประกอบทางเคมี | เส้นใยเปลือกทุเรียนแห้ง (%) [1] | กากกาแฟ (%) [20] | ชานอ้อย (%) [21] |
|-------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| ลิกนิน            | 9.89                            | 8.78             | 23.5             |
| เซลลูโลส          | 32.4                            | 25.39            | 43.8             |
| เฮมิเซลลูโลส      | 5.12                            | 37.33            | 28.6             |
| ขี้เถ้า           | 4.20                            | 3.16             | 1.3              |

นอกจากนี้พบว่าค่าทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีค่าต่ำกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากกากกาแฟเพียงเล็กน้อย แต่มีค่ามากกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อย โดยค่าทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อย, แผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยเปลือกทุเรียน และแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับกากกาแฟ และ เท่ากับ 14.4 MPa, 20 MPa และ 23 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 อันมีสาเหตุเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ โดยเฉพาะสัดส่วนของปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่อเซลลูโลส โดยจากตารางที่ 7 แสดงปริมาณเฮมิเซลลูโลสของชานอ้อย เส้นใยเปลือกทุเรียน และกากกาแฟ เท่ากับ 28.6%, 5.12% และ 37.33% ตามลำดับ ในขณะที่มีปริมาณเซลลูโลสของ ชานอ้อย เส้นใยเปลือกทุเรียน และกากกาแฟ เท่ากับ 43.8%, 32.4% และ 25.39% ตามลำดับ จึงพบว่าสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสต่อเซลลูโลสของกากกาแฟมีค่าสูงสุด ตามมาด้วยเส้นใยเปลือกทุเรียน และชานอ้อยที่น้อยที่สุด จึงส่งผลต่อค่าทนต่อแรงดึงอย่างเห็นได้ชัดจนที่พบว่าค่าทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อยมีค่าทนต่อแรงดึงต่ำที่สุด เนื่องจากมีค่าของ Relatively flexible hemicellulose-cellulose-hemicellulose bond ที่ต่ำกว่านั่นเอง จึงส่งผลให้แผ่น

อัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อยมีค่าทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำที่สุด

สำหรับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยเปลือกทุเรียน มีค่าต่ำกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อย เท่ากับ 359.287 MPa และ 880.100 MPa ตามลำดับ โดยค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปภายใต้แรงกระทำในช่วงยืดหยุ่น (Elastic State) ของวัสดุ (Stiffness) นั้นเอง โดยค่ามอดูลัสยังสามารถหาจากค่าลิมิตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้น (Stress) ต่อความเครียด (Strain)

โดยสาเหตุที่ทำให้แผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับชานอ้อยมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) สูงกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีปริมาณเซลลูโลสของชานอ้อยมีค่าสูงกว่าเส้นใยจากเปลือกทุเรียน ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยปริมาณเซลลูโลสของชานอ้อย และเปลือกทุเรียน เท่ากับ 43.8% และ 32.4% ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าความหนาแน่น และค่า Young's modulus ของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส [22]

| องค์ประกอบ (Material) | ความหนาแน่น Density (kg/m <sup>3</sup> ) | ค่า Young's modulus (GPa)    |
|-----------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| ลิกนิน                | 1200 – 1250 [ 23]                        | 2.5 – 3.7 [24,25]            |
| เซลลูโลส              | 1450 – 1590 [23]                         | 120-140 [26, 27]<br>167 [28] |
| เฮมิเซลลูโลส          | -                                        | 5 – 8 [29]                   |

โดยจากการศึกษาของ Lorna J. Gibson, 2012 ที่ทำการศึกษาค่า Young's modulus ของลิกนิน

## AMM-277

เซลลูโลส และเอมิเซลลูโลสของเส้นใย พบว่าเซลลูโลสมีค่ายังมอดุลัสสูงมากถึง 120-140 GPa ในขณะที่เอมิเซลลูโลสมีค่ายังมอดุลัสต่ำมากเพียง 5 – 8 GPa เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 7 ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยอ้อยจึงมีค่าสูงกว่าแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียน

สมบัติของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยเปลือกทุเรียนมีค่าสมบัติอยู่ในช่วงเดียวกับสมบัติของแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ ดังนั้นแผ่นอัดจาก rHDPE ร่วมกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ที่สามารถจะลดปัญหาการกำจัดขยะเปลือกทุเรียนและขวดน้ำพลาสติก รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่ง

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยในการดำเนินการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการสภาวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเงินในการดำเนินการวิจัย และศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรพงษ์ ภาสุปรีย์ สำหรับคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการดำเนินการวิจัย และขอขอบพระคุณ ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วง

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] สโรชา เจริญวัย, สรพงษ์ ภาสุปรีย์, อนินท์ มีมนต์, ชนากานต์ อาษาสุจริต และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2555), รายงานการวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเชื่อมประสานที่ย่อยสลายได้จากเปลือกทุเรียนหมอนทองในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด

- [2] Charoenvai, S., 2013, "Durian Peel Fiber and HDPE Composites Obtained by Extrusion", 11<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Phuket, Thailand, December.
- [3] Charoenvai, S., 2013, "Durian Peel Fiber and HDPE Composites Obtained by Extrusion", Energy Procedia (Accepted)
- [4] Charoenvai, S., Yingyuen, W., Jewyee, A., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S., 2013, "Comparative evaluation on product properties and energy consumption of single microwave dryer and combination of microwave and hot air dryer for durian peel particleboards", Energy Procedia, pp. 479-492.
- [5] Charoenvai, S., "New Insulating Material: Binderless Particleboard from Durian Peel", 2013, Advanced in Civil Engineering and Building Materials, pp. 119-124.
- [6] Asasutjarit, C., Charoenvai S\*, Hirunlabh J., Khedari J., , 2009 "Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites", Composites Part B: Engineering, Vol. 40, Iss. 7 pp. 633-637. Asasutjarit, C., Charoenvai S\*, Hirunlabh J., Khedari J., 2008,"Effect of pretreatment on properties of coir-based green composite", Advanced Materials Research, Vols. 47-50, pp. 678 – 681.
- [7] Asasutjarit, C., Hirunlabh J., Khedari J., Charoenvai S., Zeghmati B., Cheul Shin U., 2007, "Development of coconut coir-based lightweight cement board", Journal of construction and building materials, Volume 21, Issue 2, Pages 277-288.
- [8] Charoenvai, S, J. Khedari, J. Hirunlabh, C. Asasutjarit, B. Zeghmati, D. Quenard and

## AMM-277

N. Pratintong, 2005, "Heat and moisture transport in durian fiber based lightweight construction materials", *Journal of Solar Energy*, Volume 78, Issue 4, April 2005, Pages 543-553.

[9] Khedari, J., Charoenvai, S. and Hirunlabh, J., 2003, "New insulating particleboards from durian peel and coconut coir" *Journal of Building and Environment*, Vol. 38, Issue 3, pp. 435-441.

[10] Kraiem, D., Pimber, S., Ayadi, A., Bradai, C., 2013, Effect of low content reed (*Phragmites australis*) fibers on the mechanical properties of recycled HDPE composites, *Composite: Part B*, pp. 368 – 374.

[11] Mulinari, D., R., Voorwald, J., J., C., Cioffi, M., O., H., Silva, M., L., C.P., Cruz, T., G., Saron, C., 2009, Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion, *Composite Science and Technology*, pp. 214 – 219.

[12] Choudhury, A., 2008, Isothermal crystallization and mechanical behavior of inomer treated sisal/HDPE composites, *Material Science and Engineering A*, pp. 492 -500.

[13] อติศักดิ์ ขานทอง, ฤทธิ์ชัย จันทน์คำเรือง, อรรถกฤต ครุฑปักซี่, (2553) การเตรียมและสมบัติเชิงกลบางประการของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล (ขวดน้ำดื่ม HDPE กับกากกาแฟ)

[14] ธนกร วิรุฬห์มงคล, อติศักดิ์ ขานทอง, ฤทธิ์ชัย จันทน์คำเรือง, อรรถกฤต ครุฑปักซี่, นที ศรีสวัสดิ์, ณรงค์ชัย โอเจริญ และ สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, (2554) การเตรียมและสมบัติเชิงกลบางประการของแผ่นอัดจากวัสดุรีไซเคิล (ขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากกาแฟ) การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2554, วันที่ 27-29 มกราคม 2554 ณ ห้องมงกุฎเพชร โรงแรมโมHAVE อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

[15] อธิพัล แจ่มชัด, (2545), "การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยผักตบชวา และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์-มาลิกแอโนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม", การประชุมการป่าไม้ประจำปี 2445 ด้านวัสดุทดแทนไม้, วันที่ 18-20 กันยายน 2545 หน้า 29-35.

[16] Boudrahem, F., Soualah A., (2011), Pb(II) and Cd (II) Removal from Aqueous Solutions Using Activated Carbon Developed from Coffee Residue Activated with Phosphoric Acid and Zinc Chloride", *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 56, pp. 1946-1955.

[17] Paulo H. Fernandes Pereira et al. (2011) Sugarcane bagasse pulping and bleaching: Thermal and Chemical Characterization, *Bioresources*, Vol. 6 (3), pp. 2471-2482.

[18] Lorna J. Gibson, 2012, "The hierarchical structure and mechanics of plant materials", *Journal of the Royal Society Interface*, CrossMark

[19] Charoenvai, S., (2013), "Durian Peel Fiber and HDPE Composites Obtained by Extrusion", 11<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Phuket, Thailand, December 18-21.

[20] Granta Design, 2008 CES Selector (materials database software).

[21] Cousins W. J., Armstrong R. W., Robinson W. H. 1975, Young's modulus of lignin from a continuous indentation test, *Journal of Material Science*, Vol. 10, 1655 – 1658.

## AMM-277

- [22] Cousins W. J., 1976. Elastic modulus of lignin as related to moisture content, Wood Science Technology, Vol. 10, pp. 9-17.
- [23] Sakurada, I., Kaji, K., 1970, Relation between the polymer conformation and the elastic modulus of the crystalline region of polymer, J. Polym. Sci. Polym. Symp., Vol. 31, pp. 57 – 76.
- [24] Matsuo, M., Sawatari, C., 1989, Crystal lattice moduli of cellulose I and II estimated in relation to molecular orientation. Polym. Prepr. Jpn., Vol. 38, 980p.
- [25] Tashiro K., Kobayashi, M., 1991, “Theoretical evaluation of three-dimensional elastic constants of native and regenerated celluloses: role of hydrogen bonds, Polymer, Vol. 32, pp. 1516 – 1526.
- [26] Cousins, W. J., 1978, “Young's modulus of hemicelluloses as related to moisture content”. Wood Sci. Technol. Vol. 12, pp. 161 – 167.
- [27] Kraiem et al. 2013, (Effect low content reed (*Phragmites australis*) fibers on the mechanical properties of recycled HDPE composites, Composites: Part B, Vol. 44, pp. 368-374