



การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฉนวนเส้นใยกล้วยเพื่อประยุกต์ใช้กับ  
ถังเก็บน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

The Thermal Properties Study of Banana Fiber Insulation to  
Covered Solar Hot Water Tank

สุลักษณ์ มงคล<sup>1\*</sup> ทวีพงศ์ เทพทวี<sup>1</sup> และธัญลักษณ์ สันเดช<sup>1</sup>

Received: November, 2016; Accepted: March, 2017

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของฉนวนใยกล้วย และศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันการสูญเสียความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนใยกล้วย การทดสอบทำในช่วงอุณหภูมิน้ำร้อน 35 - 50 °C เพื่อหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากถังเก็บน้ำร้อนเปรียบเทียบกับฉนวนยางดำ จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของฉนวนใยกล้วย (แป้งมัน : เส้นใย : น้ำ) เท่ากับ 1 : 1.2 : 8 มีความหนาแน่นเท่ากับ 367.01 kg/m<sup>3</sup> สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน มีค่าเท่ากับ 0.16 W/m•K และ 6.253 m<sup>2</sup>•K/W กรณีมีการควบคุมความชื้น ตามลำดับสำหรับการใช้งานของฉนวนชีวมวลที่ความหนา 1 cm พบว่า สามารถรักษาความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิ 35 °C ได้ดีที่สุดและมีแนวโน้มว่า ค่าการสูญเสียความร้อนจะมากขึ้นหากอุณหภูมิน้ำมีค่าสูงขึ้น สำหรับการใช้งานฉนวนชีวมวลเปรียบเทียบการใช้ฉนวนยางดำกับถังเก็บน้ำร้อนพบว่า ฉนวนชีวมวลมีค่าเฉลี่ยการสูญเสียความร้อนที่มากกว่าฉนวนยางดำ 14.60 - 55.52 %

คำสำคัญ : ฉนวนชีวมวล; ใยกล้วย; การสูญเสียความร้อน; ค่าการนำความร้อน

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

\* Corresponding Author E - mail Address: s\_mongkon@hotmail.com

## Abstract

This research studied the thermal properties of banana fiber insulation and the effectiveness preventing heat loss of hot water storage tanks covered with banana fiber insulation. The experiment was tested in the range of 35 – 50 °C of hot water temperature in order to find the amount of heat loss of the insulated tank compared with the rubber insulation. The results showed that the suitable ratio of banana fiber insulation (starch : fiber : water) was 1 : 1.2 : 8. The density of insulation was 367.01 kg/m<sup>3</sup>. The thermal properties such as the thermal conductivity and the thermal resistance were 0.16 W/m•K and 6.253 m<sup>2</sup>•K/W, respectively. For 1 cm thickness insulation, it was found that the system shows the best water temperature prevention at 35 °C and the heat loss will be higher if the water temperature is raised. In the case of using biomass insulation compared with the rubber insulation, the heat loss of biomass insulation was higher than that of the rubber insulation in the range of 14.60 – 55.52 %

Keywords: Biomass Insulation; Banana Fiber; Heat Loss; Thermal Conductivity

## บทนำ

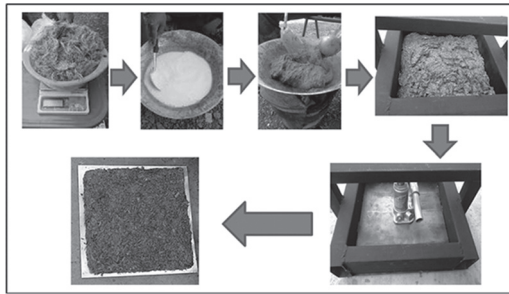
จากการรายงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [1] พบว่า ศักยภาพเชิงพลังงานจากชีวมวลของเข็ญรวมทั้งประเทศเท่ากับ 38,191.53 ktoe แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีปริมาณของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวลเป็นปริมาณมาก แต่การนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมจึงทำให้ส่วนใหญ่ถูกทิ้งหรือเผาทำลาย ทางเลือกหนึ่งคือ การนำชีวมวลมาทำเป็นฉนวนได้เนื่องจากมีเส้นใยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีสมบัติไม่นำความร้อน และมีช่องว่างเล็ก ๆ ภายในเส้นใยซึ่งช่องว่างทำหน้าที่เก็บอากาศไว้มีสภาพคล้ายเป็นฉนวนกันความร้อน ฉนวนที่ได้จากชีวมวลแต่ละชนิดจะมีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือความสามารถในการเป็นฉนวน (R-value) แตกต่างกัน ฉนวนชีวมวลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็นและการทำความร้อนได้ โดยงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานกับอาคารเป็นหลัก Pakunworakij, T. et al. [2] ได้ทำการศึกษาความเป็นฉนวนของดินมันสำปะหลัง เพื่อหาความหนาแน่นที่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด โดยฉนวนดินมันสำปะหลังที่มีความหนาแน่น 200 kg/m<sup>3</sup> หนา 10 mm จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.059 W/m•K ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิภายในห้องให้ต่ำได้ประมาณ 2.3 °C Taemthong, W. [3] ได้ศึกษาการผลิตฉนวนชีวมวลจาก ผักตบชวา ชานอ้อย และฟางข้าว เพื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในผนัง และบนฝ้าเพดาน พบว่า ฉนวนฟางข้าวที่ผสมกาวยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 0.153 W/m•K สามารถกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้ 2.7 °C ในเวลากลางวัน นอกจากนี้มีการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฉนวนชีวมวลเปรียบเทียบกับ

ฉนวนเชิงพาณิชย์ เช่น การศึกษาของ Apravate, C. et al. [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนเส้นใยปอ กับฉนวนความร้อนทั่วไปกับบ้านทดลอง จำนวน 2 หลัง ที่ติดตั้งฉนวนเส้นใยปอหนา 1 นิ้ว และฉนวนใยแก้ว เปรียบเทียบกันพบว่า ฉนวนที่ผลิตจากเส้นใยปอมีการป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้ใกล้เคียงกับฉนวนใยแก้ว สำหรับการศึกษาในต่างประเทศมีการศึกษากับชีวมวลที่หลากหลายประเภทเช่นเดียวกัน Evona, P. et al. [5] ได้ศึกษาแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเศษดอกทานตะวันโดยผสมโปรตีนและเส้นใยลิกโนเซลลูโลสพบว่า แผ่นฉนวนที่ได้จากการผลิตได้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น  $500 - 858 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าการนำความร้อน  $88.5 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$  Manohar, K. et al. [6] ศึกษาเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนระหว่างฉนวนจาก ชีวมวลจากเส้นใยมะพร้าว เส้นใยอ้อย และเส้นใยปอกระเจา กับฉนวนที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด พบว่า ค่าการนำความร้อนของฉนวนเส้นใยมะพร้าวและฉนวนเส้นใยอ้อยมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียง กับฉนวนใยแก้ว และฉนวนโพลีสไตรีน ตั้งแต่  $0.046 - 0.049 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ที่ความหนาแน่น  $40 - 90 \text{ kg/m}^3$  สำหรับฉนวนปอกระเจาที่ความหนาแน่นประมาณ  $50 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับ ฉนวนโฟม ซึ่งมีค่าการนำความร้อนประมาณ  $0.033 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

จากงานวิจัยดังกล่าวมา สามารถนำชีวมวลไปประยุกต์ใช้ในการผลิตและพัฒนาฉนวนความร้อน ได้หลากหลาย ซึ่งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในบ้านพักอาศัยเป็นอีกระบบหนึ่งที่มีความจำเป็น ที่ต้องใช้ฉนวนในการหุ้มถังเก็บน้ำร้อน ปกติมักนิยมใช้ฉนวนยางดำหุ้มเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของ น้ำในถัง ซึ่งอุณหภูมิของน้ำในถังที่ได้จากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ  $60^\circ\text{C}$  แต่เนื่องจากฉนวนใยแก้วและฉนวนยางสังเคราะห์จากสารเคมีที่นำมาหุ้มถังอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และจากประโยชน์ของชีวมวลดังที่กล่าวมา ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาฉนวนที่ทำจาก ชีวมวลทางการเกษตรเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับถังเก็บน้ำร้อน และเนื่องด้วยประเทศไทยมีการปลูกกล้วย เป็นจำนวนมาก ทุกส่วนของต้นกล้วยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ดังนั้นจึงเลือกศึกษากับชีวมวลที่ได้จากเส้นใยกล้วยซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติที่มีความเหนียว ดียึดได้ หย่นตัวได้ และทนต่อแบคทีเรียมีความเหมาะสมที่นำมาพัฒนาเป็นฉนวน โดยจะทำการศึกษา สมบัติทางความร้อนของฉนวนใยกล้วย และศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันการสูญเสียความร้อนใน ถังเก็บน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนที่พัฒนาขึ้น

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ฉนวนที่ทำการศึกษาผลิตจากเส้นใยกล้วยที่แห้งสนิทผสมกับน้ำและแป้งมันและให้ความร้อนจนผสม เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วตากไล่แม่พิมพ์แม่แรงกระปุกที่ใช้กดแผ่นเหล็กสำหรับอัดแผ่นฉนวนตัวอย่าง เพื่อผลิตฉนวนขนาด  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  ความหนา  $1 \text{ cm}$  ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำแผ่นฉนวนใยกล้วย

ในการศึกษาจะผลิตฉนวนใยกล้วย 3 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน แป้งมัน : เส้นใย : น้ำ เท่ากับ 1 : 1 : 6 อัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 และอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 ซึ่งทั้ง 3 อัตราส่วนเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก จากนั้นทำการหาความหนาแน่นและค่าความชื้นของฉนวนก่อนนำไปทดสอบหาค่าการนำความร้อน และคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน และความจุความร้อนจำเพาะของฉนวน ค่าความหนาแน่นจะหาจากอัตราส่วนระหว่างมวลของฉนวน (kg) กับปริมาตรของฉนวน ( $m^3$ ) สำหรับค่าความชื้นของฉนวนสามารถคำนวณได้จากสูตรหาความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis Moisture Content:  $M_{wb}$ ) ดังสมการที่ (1)

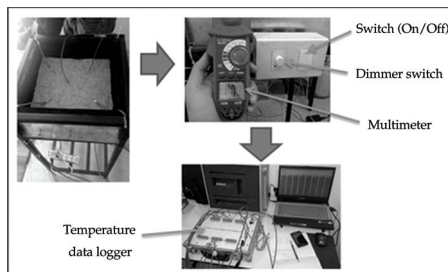
$$M_{wb} = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$M_{wb}$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

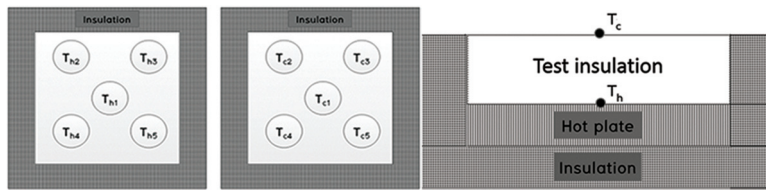
$w$  คือ มวลของวัตถุ (kg)

$d$  คือ มวลแห้งของวัตถุ (kg)



(ก) ชุดทดสอบ Hot Plate

รูปที่ 2 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของฉนวนใยกล้วย



(ข) จุดวัดอุณหภูมิผิวนวน (อุณหภูมิฝั่ง Hot Plate  $T_h$  และฝั่งอากาศแวดล้อม  $T_c$ )  
รูปที่ 2 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของฉนวนใยแก้ว (ต่อ)

ในรูปที่ 2 (ก) แสดงการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วจะใช้ชุดทดสอบ Hot Plate ที่พัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C177 [7] - [8] ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนคือ พลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำจากเหล็กกล่องทำเป็นโครงเหล็กสำหรับยึดแผ่นอะลูมิเนียม ความหนา 0.4 mm กว้าง 32 cm ยาว 32 cm สูง 5.7 cm แผ่น Hot Plate ใช้แผ่นเหล็กหนา 0.4 cm ขนาด 30 x 30 cm<sup>2</sup> ภายในด้านข้างทั้ง 4 ด้าน बुด้วยฉนวนยางดำหนา 2 cm และด้านล่างบุฉนวนหนา 3 cm เนื่องจากขดลวดความร้อนที่ใช้มีขนาดสำหรับต่อสายไฟยาวประมาณ 3 cm จึงบุฉนวนเพื่อป้องกันส่วนประกอบต่าง ๆ ในการทดสอบทำโดยนำฉนวนตัวอย่างวางลงในชุดทดสอบที่รับความร้อนจากขดลวดให้ความร้อน มีขนาด 400 W โดยได้ตั้งค่ากระแสของขดลวดความร้อนไว้ที่ 0.4 A<sub>ac</sub> แรงดันไฟฟ้า 220 V<sub>ac</sub> จากนั้นติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล Type k ที่หุ้มด้วยฉนวนไฟเบอร์กลาส เพื่อวัดอุณหภูมิผิวนวนด้านที่ติดกับ Hot Plate ( $T_h$ ) จำนวน 5 จุด และฝั่งที่ติดกับอากาศแวดล้อม ( $T_c$ ) จำนวน 5 จุด บันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที โดยใช้ TSUS/Ez data logger เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าอุณหภูมิผิวนวนที่อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) มาเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการนำความร้อนจากสมการ Fourier's law of conduction ซึ่งกำหนดให้เป็นการนำความร้อน 1 มิติ จาก  $x = 0$  เมื่อ  $T(0) = T_1$  ถึง  $x = L$  เมื่อ  $T(L) = T_2$  ดังสมการที่ (2) [9] สำหรับการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฉนวนตัวอย่าง หรือจะใช้แหล่งความร้อนจากขดลวดทำความร้อน สามารถทำได้ดังสมการที่ (3) [7]

$$q_x = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

$$q_x = EI \quad (3)$$

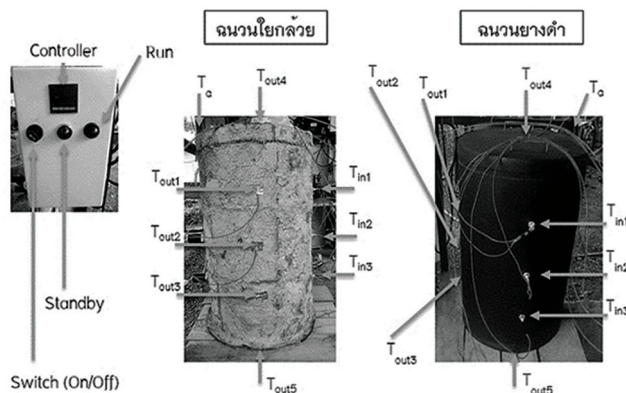
โดยที่  $q_x$  คือ ความร้อนที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (W)  $A$  คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านในทิศทางตั้งฉาก (m<sup>2</sup>)  $T_1, T_2$  คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 (K) โดยในการทดสอบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 1 คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวนวนด้านที่ติดกับ Hot Plate ( $T_h$ ) และอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 2 คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวนวนด้านที่ติดกับอากาศแวดล้อม ( $T_c$ ) ดังรูปที่ 2 (ข)  $L$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)  $k$  คือ ค่าการนำความร้อน (W/m•K)  $E$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ทำความร้อน (V) และ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านอุปกรณ์ทำความร้อน (A)

สำหรับค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance:  $R$ ) หรือค่า R-value ของฉนวนจะแปรผันตามความหนาของวัสดุและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุสามารถหาดังสมการที่ (4) [10] และการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity:  $C_p$ ) สามารถหาดังสมการที่ (5) [8]

$$R = \frac{L}{k} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (5)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )  $m$  คือ มวลของวัตถุ ( $\text{kg}$ )  $Q$  คือปริมาณความร้อนที่วัตถุได้รับ ( $\text{J}$ ) และ  $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของวัตถุ ( $\text{K}$ )



รูปที่ 3 การทดสอบฉนวนใยกล้วยเมื่อนำมาหุ้มถังเก็บน้ำร้อนและเปรียบเทียบกับการใช้ฉนวนยางดำ

หลังจากทดสอบหาค่าการนำความร้อนและคัดเลือกฉนวนใยกล้วยที่มีอัตราส่วนที่ดีที่สุดแล้ว ได้ทำการทดสอบการใช้งานของฉนวนใยกล้วยกับถังเก็บน้ำร้อนที่นิยมใช้งานกับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย ขนาด 150 ลิตร ที่มีพื้นที่ผิวของถังที่ใช้สำหรับบรรจุน้ำ  $1.45 \text{ m}^2$  และพื้นที่ของฝาปิดถังน้ำร้อน  $0.19 \text{ m}^2$  และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียความร้อนกับกรณีหุ้มถังเก็บน้ำร้อนด้วยฉนวนยางดำ การวิเคราะห์ผลกระทำในสภาวะที่อุณหภูมิความร้อนคงที่ (Steady State) ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวสมมติเป็นอุณหภูมิของน้ำร้อนสูงสุดที่ได้จากน้ำร้อนที่ผ่านแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ชุดลดความร้อนแบบแท่งหรือ Immersion Heater ขนาด 1.5 kW จำนวน 2 แท่งให้ความร้อนแทนการทดสอบกับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ทดสอบเท่ากับ 35 40 45 และ 50 °C ในรูปที่ 3 แสดงการกำหนดจุดวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำร้อน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ จุดวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำร้อน ( $T_{in1}$   $T_{in2}$   $T_{in3}$ ) และจุดวัดอุณหภูมิผิวฉนวนด้านนอกถัง ( $T_{out1}$   $T_{out2}$   $T_{out3}$   $T_{out4}$   $T_{out5}$ ) การรักษาระดับอุณหภูมิภายในถังจะใช้ Controller รักษาอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ บันทึกข้อมูล

เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจะหยุดการทำงานในชดลวดความร้อน และสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังต่อเนื่องอีก 3 - 4 ชั่วโมง และคำนวณหาค่าการสูญเสียความร้อน  $Q_{loss}$  จากสมการที่ (6) - (7) [8] - [9]

$$Q_{loss} = UA(\Delta T) \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{\sum RA} \quad (7)$$

โดยที่  $U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $W/m^2 \cdot K$ )  $A$  คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )  $R$  คือ ค่าความต้านทานความร้อน ( $K/W$ ) และ  $\Delta T$  คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลสองชนิด ( $K$ )

สำหรับสมดุลของถังเก็บน้ำร้อนที่ใช้ชดลวดทำความร้อนให้ความร้อนแก่น้ำในถังอธิบายได้จากสมดุลพลังงานดังนี้

$$Q_{store} = Q_{in} - Q_{loss} \quad (8)$$

$$Q_{in} = EI \quad (9)$$

โดยที่  $Q_{store}$  คือ ความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อน ( $W$ )  $Q_{in}$  คือ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำได้รับจาก Heater ( $W$ )  $E$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ทำความร้อน ( $V$ )  $I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ทำความร้อน ( $A$ )

## ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 1. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของฉนวนใยแก้ว

ในขั้นตอนการผลิตฉนวนใยแก้วแต่ละอัตราส่วน ได้ผสมเส้นใยลงในน้ำและเค็มแป้นมันลงโดยตรง ทำให้ส่วนผสมมีค่าความชื้นสูงมาก จากนั้นได้นำแผ่นฉนวนแต่ละอัตราส่วนไปตากแห้งจนได้ตัวอย่างแผ่นฉนวนที่พร้อมนำมาทดสอบ ก่อนที่จะนำแผ่นฉนวนที่จะนำไปทดสอบหาค่าการนำความร้อนได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฉนวนแต่ละอัตราส่วน ได้แก่ ความชื้นมาตรฐานเปียก และความหนาแน่น สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฉนวนใยกล้วยที่ความหนา 1 cm

| อัตราส่วน แป้งมัน : เส้นใย : น้ำ (g) | $M_{wb}$ (%wb) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 150 : 150 : 900 หรือ 1 : 1 : 6       | 2.60           | 357.36                      |
| 150 : 165 : 1200 หรือ 1 : 1.1 : 8    | 11.32          | 401.18                      |
| 150 : 180 : 1200 หรือ 1 : 1.2 : 8    | 6.26           | 367.01                      |

จากตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของแผ่นฉนวน โดยค่าความขึ้นมาตรฐานเปียกของแผ่นฉนวนชีวมวล แต่ละอัตราส่วนที่ผ่านการตากแห้งแล้ว มีค่าตั้งแต่ 1.90 - 15 % และความหนาแน่นของแผ่นฉนวนมีค่าตั้งแต่ 290 - 420 kg/m<sup>3</sup> สำหรับฉนวนอัตราส่วน 1 : 1 : 6 มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 2.60 % มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 357.36 kg/m<sup>3</sup> ฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 11.32 % และมีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 401.18 kg/m<sup>3</sup> สำหรับอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.26 % มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 367.01 kg/m<sup>3</sup> จากข้อสังเกตพบว่า อัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 มีความหนาแน่นน้อยกว่าอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 ที่มีปริมาณเส้นใยน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักของฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 ที่ซึ่งได้มีค่าน้อยกว่าฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 ในขณะที่ปริมาตรของแผ่นฉนวนทั้ง 2 อัตราส่วนมีค่าเท่ากัน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 นั้นเอง

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฉนวนใยกล้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ความหนา 1 cm

| อัตราส่วน<br>แป้งมัน : เส้นใย : น้ำ (g) | $T_h - T_c$<br>(°C) | $T_{amb}$<br>(°C) | $k$<br>(W/m•K) | $R$<br>(m <sup>2</sup> •K/W) | $C_p$<br>(kJ/kg•K) |
|-----------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|--------------------|
| 150 : 150 : 900 หรือ 1 : 1 : 6          | 62.62               | 29.70             | 0.159          | 6.284                        | 0.312              |
| 150 : 165 : 1200 หรือ 1 : 1.1 : 8       | 61.02               | 26.73             | 0.164          | 6.106                        | 0.290              |
| 150 : 180 : 1200 หรือ 1 : 1.2 : 8       | 62.44               | 33.77             | 0.160          | 6.253                        | 0.292              |

ในตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษาศักยภาพความร้อนของฉนวนใยกล้วยที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน พบว่า ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิผิวฉนวนด้านที่ติดกับ Hot Plate ( $T_h$ ) และอุณหภูมิฝั่งที่ติดกับอากาศแวดล้อม ( $T_c$ ) มีผลทำให้ค่าการนำความร้อนของอัตราส่วนทั้ง 3 อัตราส่วนต่างกัน ภายใต้การทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.70 26.73 และ 33.77 °C ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำและปริมาณเส้นใยที่ใช้ทำฉนวนแต่ละตัวอย่างแตกต่างกันจึงส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสองทำให้ผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวฉนวนที่ติดกับ Hot Plate และผิวฉนวนด้านที่ติดกับอากาศแวดล้อมของอัตราส่วน 1 : 1 : 6 มากกว่าอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 และอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 มีค่าเท่ากับ 62.62 62.44 และ 61.02 °C ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) ของอัตราส่วน 1 : 1 : 6 ค่าที่สุด ลำดับต่อมาคือ อัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 และอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาฉนวนใยกล้วยอัตราส่วน 1 : 1 : 6 มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.159 W/m•K ค่าความต้านทานความร้อน

เท่ากับ  $6.284 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  และค่าความจุความร้อนเท่ากับ  $0.312 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  ซึ่งเมื่อนำขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนแล้วการประสานกันระหว่างเส้นใยกับน้ำแป้งมันยังประสานกันได้ไม่ดี เนื่องจากมีปริมาณน้ำน้อยเกินไปไม่เพียงพอต่อการผสมเส้นใยจึงทำให้แผ่นฉนวนมีการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) สำหรับอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 แผ่นฉนวนมีการประสานกันระหว่างเส้นใยและน้ำแป้งมันได้ค่อนข้างดี มีความเหนียว แต่มีความชื้นสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ  $0.164 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  ค่าความต้านทานความร้อนเท่ากับ  $6.106 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  และค่าความจุความร้อนเท่ากับ  $0.290 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  ดังรูปที่ 4 (ข) สำหรับแผ่นฉนวนอัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ  $0.160 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  ซึ่งน้อยกว่าค่าการนำความร้อนของอัตราส่วน 1 : 1.1 : 8 เล็กน้อย ทำให้ค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ  $6.253 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  และค่าความจุความร้อนเท่ากับ  $0.292 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  ลักษณะฉนวนมีการประสานกันได้ดี มีความแข็งแรง ไม่แตกหักง่าย และยังสามารถคงสภาพไว้ได้นานดังรูปที่ 4 (ค) แม้ว่าจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าฉนวนอัตราส่วน 1 : 1 : 6 เล็กน้อย แต่ลักษณะฉนวนที่มีคุณภาพดี ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งานกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนผสม 1 : 1.2 : 8 ผลิตฉนวนเพื่อนำไปทดสอบกับถังเก็บน้ำร้อนต่อไป



(ก) อัตราส่วน 1 : 1 : 6



(ข) อัตราส่วน 1 : 1.1 : 8



(ค) อัตราส่วน 1 : 1.2 : 8

รูปที่ 4 ตัวอย่างแผ่นฉนวน

จากข้อมูลในตารางที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฉนวนใยกล้วยกับฉนวนชีวมวลประเภทอื่นจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า ฉนวนใยกล้วยมีสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับฉนวนฟางข้าวมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นและความชื้นของฉนวนทั้ง 2 ชนิด ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยฉนวนใยกล้วยมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าฉนวนฟางข้าวเล็กน้อย และค่าการต้านทานความร้อนต่ำกว่าเล็กน้อยประมาณ 4.57 % และ 4.43 % อย่างไรก็ตามฉนวนใยกล้วยที่ทำการศึกษามีค่าความจุความร้อนต่ำกว่าฉนวนต่าง ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการอัดแผ่นฉนวนที่ทำให้มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน สำหรับสมบัติทางความร้อนของฉนวนชีวมวลอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบกับฉนวนใยกล้วยอาจมีเงื่อนไขสมบัติกายภาพที่ไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามสามารถนำข้อมูลเพื่อประกอบเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้หรือศึกษาฉนวนชีวมวลในอนาคตได้

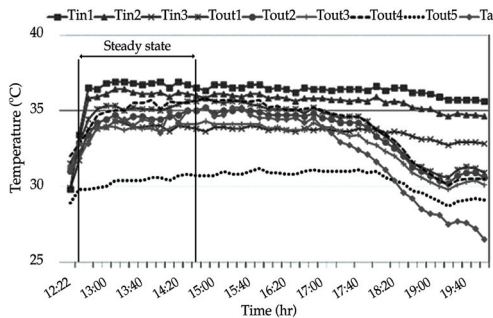
## 2. การทดสอบการใช้งานของแผ่นฉนวนใยกล้วยหุ้มถังเก็บน้ำร้อน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฉนวนใยกล้วยกับฉนวนชีวมวลอื่น ๆ

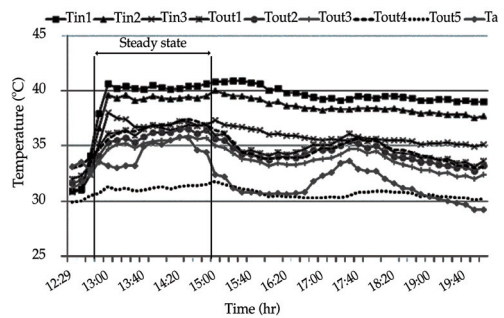
| ตัวอย่างแผ่นฉนวน<br>ชีวมวล             | ความหนาแน่น<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ความชื้น<br>(%wb) | ค่าการนำ<br>ความร้อน<br>(W/m•K) | ค่าความ<br>ต้านทาน<br>ความร้อน<br>(m <sup>2</sup> •K/W) | ค่าความจุ<br>ความร้อน<br>(kJ/kg•K) |
|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|
| ฉนวนฟางข้าว [3]                        | 275                                 | 8.6               | 0.153                           | 6.54                                                    | 0.6                                |
| ฉนวนเส้นใยปอ [4]                       | -                                   | -                 | 0.015                           | 66.67                                                   | 1.6 - 1.7                          |
| ฉนวน TPM ผสมกับ<br>เปลือกข้าวโพด [5]   | 726                                 | -                 | 0.140                           | 7.15                                                    | -                                  |
| ฉนวนใบยางพารา [11]                     | -                                   | -                 | 0.080                           | 12.50                                                   | -                                  |
| ฉนวนชานอ้อย [12]                       | 100                                 | -                 | 0.046                           | 21.73                                                   | -                                  |
| ฉนวนเส้นใยมะพร้าว [13]                 | 1,800                               | -                 | 0.370                           | 2.70                                                    | -                                  |
| ฉนวนเส้นใย<br>ปาล์มน้ำมัน [13]         | 1,970                               | -                 | 0.270                           | 3.70                                                    | -                                  |
| ฉนวนใยกล้วย<br>(อัตราส่วน 1.2 : 1 : 8) | 367.01                              | 6.26              | 0.160                           | 6.253                                                   | 0.292                              |

ในรูปที่ 5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{in1}$   $T_{in2}$   $T_{in3}$ ) ที่หุ้มด้วยฉนวนใยกล้วยที่มีความชื้นก่อนทดสอบเท่ากับ 0.16 %wb จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทุกกรณีแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงการให้ความร้อนแก่น้ำในถังโดยใช้ขดลวดความร้อนแบบแท่ง ซึ่งความร้อนที่ใช้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้ำในถังและทำให้อุณหภูมิน้ำในถังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 2 เป็นช่วงควบคุมอุณหภูมิน้ำในถังให้อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง โดยควบคุมการทำงานของ Heater เพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิน้ำในถัง ช่วงที่ 3 เป็นช่วงหยุดให้ความร้อนแก่น้ำและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนอีก 5-6 ชั่วโมง ซึ่งช่วงนี้จะได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม ( $T_a$ ) ที่ลดลงในช่วงเวลาตอนเย็น ส่งผลให้อุณหภูมิผิวฉนวนด้านข้าง ( $T_{out1}$   $T_{out2}$   $T_{out3}$ ) ลดลงตามไปด้วย จึงเกิดการสูญเสียความร้อนออกจากถังสู่บรรยากาศมากขึ้น การหาความร้อนที่สูญเสียจากสมการที่ (6) หากในเทอมของผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิผิวฉนวนมีค่ามากขึ้นแสดงว่า ความร้อนที่สูญเสียผ่านถังที่หุ้มด้วยฉนวนใยกล้วยย่อมมีค่ามากขึ้นตามผลต่างของอุณหภูมิโดยที่ค่า UA ของถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนลดลง ข้อสังเกตประการหนึ่งพบว่า อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ณ ตำแหน่งบน กลาง ล่าง ของถัง ในช่วงเวลาทดสอบและในแต่ละกรณีจะเกิดการแยกชั้นซึ่งอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ด้านบนสุดของถัง รองลงมาคือ อุณหภูมิตรงกลางถัง และอุณหภูมิต่ำที่สุดอยู่ที่ส่วนล่างถัง สำหรับอุณหภูมิผิวฉนวนด้านบนถัง ( $T_{out4}$ ) จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิผิวฉนวนด้านข้าง และอุณหภูมิผิวฉนวน

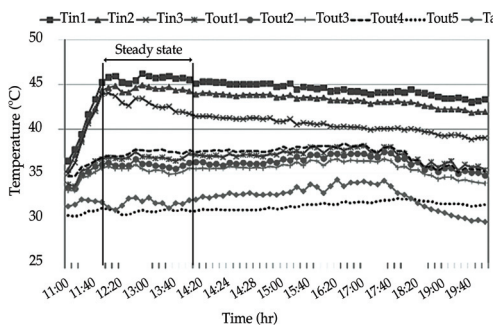
ด้านล่าง ( $T_{out5}$ ) จะมีค่าต่ำสุดเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนต่ำสุดจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ของถังเก็บน้ำร้อน



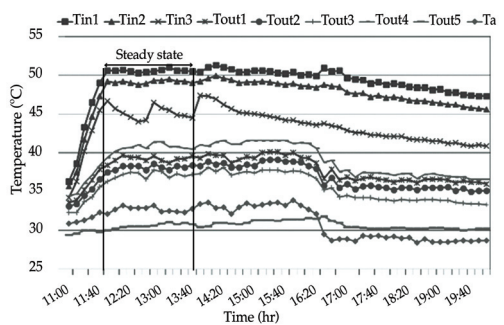
(ก) อุณหภูมิน้ำร้อน 35 °C



(ข) อุณหภูมิน้ำร้อน 40 °C



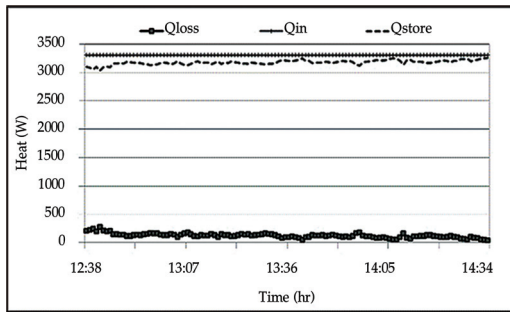
(ค) อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C



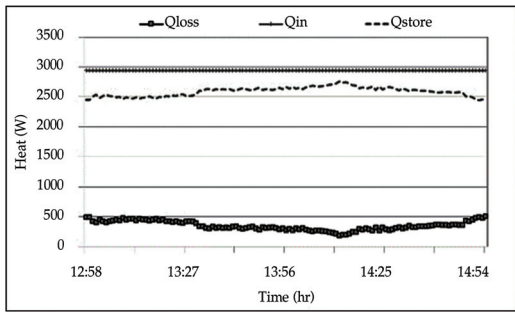
(ง) อุณหภูมิน้ำร้อน 50 °C

รูปที่ 5 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำร้อน

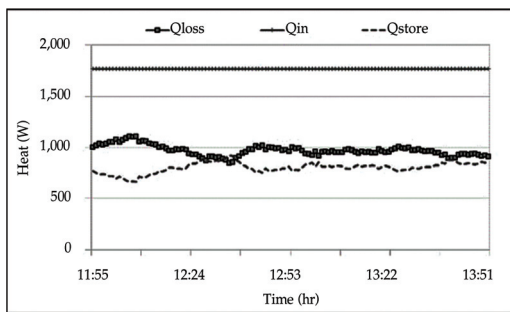
จากการทดลองการเก็บรักษาน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ฉนวนใยแก้วมีความสามารถรักษาระดับอุณหภูมิน้ำร้อนในกรณีที่มีอุณหภูมิน้ำร้อนไม่สูงมากนัก เช่น การใช้งานที่อุณหภูมิน้ำ 35 และ 40 °C ได้ค่อนข้างดี สามารถรักษาความร้อนได้อย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานานที่สุดถึง 4 ชั่วโมง ถึงแม้จะหยุดให้ความร้อนแก่ชุดลดความร้อนแล้ว และหลังจากนั้นอุณหภูมิน้ำในถังจะเริ่มลดลงดังรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ข) สำหรับการใช้งานฉนวนใยแก้วเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำ 45 และ 50 °C สามารถรักษาอุณหภูมิน้ำได้ในระยะเวลาที่สั้นกว่าดังรูปที่ 5 (ค) และ 5 (ง) อย่างไรก็ตามการรักษาน้ำร้อนในถังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อมภายนอกที่กล่าวไว้ข้างต้น



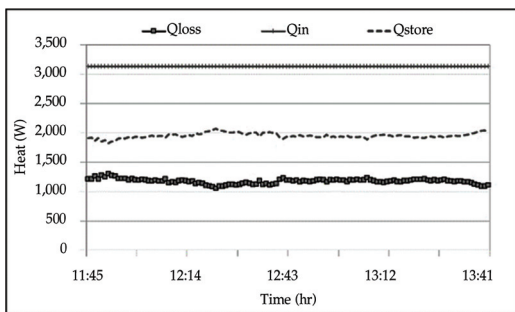
(ก) อุณหภูมิน้ำร้อน 35 °C



(ข) อุณหภูมิน้ำร้อน 40 °C



(ค) อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C



(ง) อุณหภูมิน้ำร้อน 50 °C

รูปที่ 6 สมดุลพลังงานของถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มด้วยฉนวนใยกล้วย (พิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงที่)

จากรูปที่ 6 แสดงสมดุลพลังงานของถังเก็บน้ำร้อนในการทดสอบที่อุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ในช่วงสภาวะคงที่ ได้แก่ การหาค่าความร้อนที่น้ำได้รับจากขดลวดความร้อน ( $Q_{in}$ ) ความร้อนที่เก็บรักษาในถัง ( $Q_{store}$ ) และความร้อนที่สูญเสีย ( $Q_{loss}$ ) ที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านฉนวนและการพาความร้อนจากบรรยากาศภายนอกพบว่า การสูญเสียความร้อนในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิน้ำในถังเท่ากับ 35 °C มีค่าน้อยที่สุดคิดเป็น 3.85 % ของความร้อนที่ให้จากขดลวดความร้อน ฉนวนใยกล้วยสามารถเก็บรักษาความร้อนได้ 96.15 % แต่หากเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนสูงขึ้นแนวโน้มของความร้อนที่สูญเสียจากถังจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิน้ำร้อน 40 45 และ 50 °C มีความร้อนที่สูญเสียออกจากถังคิดเป็น 9.42 54.74 และ 37.71 % ตามลำดับ ทำให้ฉนวนใยกล้วยสามารถเก็บรักษาความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนได้ 90.58 45.26 และ 62.29 % ตามลำดับ สาเหตุที่อุณหภูมิน้ำร้อนที่ 45 °C สูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดเนื่องจากในช่วงที่ทำการทดลองอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การศึกษาสามารถบ่งบอกได้ว่า หากเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนสูงขึ้นแนวโน้มของการสูญเสียความร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มด้วยฉนวนด้วยใยกล้วยที่นำมาทดสอบจะเพิ่มขึ้น ตามลำดับ สำหรับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนใยกล้วยกรณีทดสอบที่อุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ กัน สรุปได้ดังตารางที่ 4

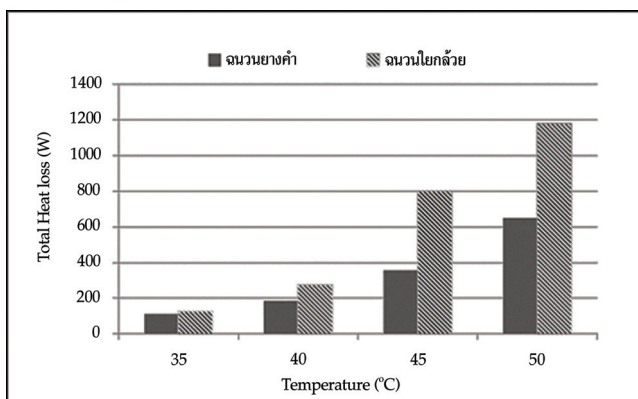
### 3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานกับกรณีที่ใช้ฉนวนยางดำ

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาการใช้งานถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนใยแก้ว ความหนา 1 cm เปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนกับถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มด้วยฉนวนยางดำความหนา 1 cm ที่อุณหภูมิทดสอบของน้ำร้อน 35 40 45 และ 50 °C โดยค่าการนำความร้อนของฉนวนยางดำ ที่นำมาทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.038 W/m•K

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนใยแก้ว ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

| ค่าพารามิเตอร์                                                                       | อุณหภูมิที่ติดตั้งไว้ (°C) |       |            |       |            |       |            |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|                                                                                      | 35                         |       | 40         |       | 45         |       | 50         |       |
|                                                                                      | ใย<br>แก้ว                 | ยางดำ | ใย<br>แก้ว | ยางดำ | ใย<br>แก้ว | ยางดำ | ใย<br>แก้ว | ยางดำ |
| ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในถัง (°C)                                                          | 35.23                      | 35.63 | 39.33      | 39.83 | 44.90      | 44.24 | 49.88      | 50.44 |
| ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวฉนวน (°C)                                                        | 34.55                      | 34.06 | 36.02      | 36.30 | 36.01      | 36.32 | 38.12      | 42.24 |
| ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อม (°C)                                                        | 34.25                      | 33.31 | 34.51      | 33.90 | 31.69      | 33.25 | 32.73      | 34.20 |
| ระยะเวลาที่รักษาความร้อน<br>ในถังให้คงที่ หลังจากหยุดให้<br>ความร้อนกับน้ำ (ชั่วโมง) | 4                          | 6     | 1.5        | 3     | 1.5        | 3     | 3          | 3     |

จากตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนใยแก้ว และฉนวนยางดำกรณีทดสอบที่อุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ กัน พบว่าในช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิในถังให้อยู่ในสภาวะคงที่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิแวดล้อมในบริเวณทดสอบแต่ละกรณีทั้งฉนวนใยแก้ว และฉนวนยางดำมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 33 - 34.5 °C โดยเฉพาะกรณีทดสอบฉนวนใยแก้วที่อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C มีค่าอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ ประมาณ 2-3 °C สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของการรักษาอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนให้คงที่พบว่า การใช้ฉนวนยางดำจะสามารถรักษาอุณหภูมิในถังได้ยาวนานกว่าประมาณ 1.5 - 2 เท่า ของการใช้ฉนวนใยแก้ว อย่างไรก็ตามการทดสอบที่อุณหภูมิ น้ำร้อน 50 °C ความสามารถในการเก็บรักษาใกล้เคียงกับการใช้ฉนวนยางดำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัย สภาพแวดล้อมที่ทดลองในแต่ละเงื่อนไข เช่น ความเร็วลมที่อาจส่งผลต่อความร้อนที่สูญเสียจากถังเก็บน้ำร้อน หลังจากผ่านสภาวะ Steady State



รูปที่ 7 ความร้อนที่สูญเสียผ่านถังน้ำร้อนที่มีการหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเปรียบเทียบกับฉนวนยางดำ

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่สูญเสียของถังเก็บน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนใยแก้วเปรียบเทียบกับฉนวนยางดำในช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิในถังให้อยู่สภาวะคงที่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ในแต่ละกรณีตั้งแต่ 35 40 45 และ 50 °C ผลจากการศึกษาพบว่า ฉนวนทั้งสองประเภทมีค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังที่หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วและฉนวนยางดำ มีค่าน้อยที่สุดในกรณีทดสอบที่อุณหภูมิถังน้ำร้อน 35 °C โดยมีค่าเท่ากับ 127.24 และ 109.18 W โดยถังที่หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วมีความร้อนสูญเสียผ่านผนังของถังมากกว่าถังที่หุ้มด้วยฉนวนยางดำ 14.60 % ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิถังน้ำร้อน 40 °C ซึ่งการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนเนื่องจากการหุ้มฉนวนใยแก้วมีค่ามากกว่าฉนวนยางดำ 33.33 % สำหรับกรณีที่อุณหภูมิถังน้ำร้อน 45 และ 50 °C มีค่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังของถังค่อนข้างมากคิดเป็น 55.52 และ 45.09 % นอกจากนั้นพบข้อสังเกตว่า ความร้อนสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำร้อนในถัง ในส่วนของความร้อนที่น้ำได้รับจากขดลวดความร้อนแต่ละกรณีนั้นอาจมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในถังไม่เท่ากันทำให้ระยะเวลาที่ให้ความร้อนจากอุณหภูมิถังน้ำเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการไม่เท่ากัน ซึ่งในกรณีที่ต้องการน้ำที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาให้ความร้อนที่นานขึ้น ค่าความร้อนที่ทำได้จากสมดุลความร้อนในแต่ละกรณีแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านฉนวนใยแก้วและฉนวนยางดำที่ความหนา 1 cm

| ชนิดฉนวน   | Water Temperature (°C) | $Q_{loss}$ |                     | $Q_{in}$ (W) | $Q_{store}$ (W) |
|------------|------------------------|------------|---------------------|--------------|-----------------|
|            |                        | (W)        | (W/m <sup>2</sup> ) |              |                 |
| ฉนวนใยแก้ว | 35                     | 127.24     | 87.75               | 3,304.45     | 3,177.21        |
|            | 40                     | 277.08     | 191.09              | 2,942.53     | 2,665.45        |
|            | 45                     | 968.92     | 668.22              | 1,769.96     | 801.04          |
|            | 50                     | 1,178.33   | 812.64              | 3,124.74     | 1,946.41        |
| ฉนวนยางดำ  | 35                     | 109.18     | 72.30               | 3,220.77     | 3,111.59        |
|            | 40                     | 184.72     | 127.39              | 2,704.10     | 2,519.38        |
|            | 45                     | 356.34     | 245.75              | 2,960.81     | 2,604.47        |
|            | 50                     | 647.41     | 446.49              | 2,891.02     | 2,243.61        |

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาความร้อนที่มีการสูญเสียและอัตราการสูญเสียความร้อนต่อพื้นที่ผิวของถังเก็บน้ำร้อนพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ท่วมด้วยฉนวนใยแก้วมีค่า 45 และ 50 °C จะมีการสูญเสียความร้อนมาก หากต้องการลดปริมาณความร้อนสูญเสียให้เท่ากับถังเก็บน้ำร้อนที่ท่วมด้วยฉนวนยางดำสามารถคำนวณหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวนใยแก้วเพื่อนำไปใช้ในกรณีที่อุณหภูมิ 45 และ 50 °C ควรมีความหนาของฉนวนใยแก้วประมาณ 1.74 และ 2.81 cm อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะลักษณะทางกายภาพของฉนวนทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกันในส่วนช่องว่างอากาศภายในเนื้อฉนวนของยางดำนั้นมีความหนาแน่นมากเมื่อเทียบกับฉนวนใยแก้ว ซึ่งช่องว่างอากาศนี้เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนไหลผ่านแผ่นฉนวนก็จะส่งผลต่อแผ่นฉนวนชนิดนั้น

เมื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่นำมาใช้พบว่า ต้นทุนการผลิตฉนวนใยแก้วโดยคิดจากราคาตัวประสานและราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต ไม่คิดราคาใยแก้วเนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีต้นทุนเท่ากับ 241.50 บาท/m<sup>2</sup> ซึ่งต่ำกว่าฉนวนยางดำที่นำมาทดสอบมีต้นทุนเท่ากับ 250 บาท/m<sup>2</sup> อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานความร้อนยังมีค่าต่ำกว่าฉนวนยางดำและในการเปรียบเทียบการใช้งานระยะยาวระหว่างฉนวนใยแก้วที่ทำการศึกษาและฉนวนยางดำพบว่าอายุการใช้งานของใยแก้วสั้นกว่าฉนวนยางดำที่มีอายุเฉลี่ยการใช้งานประมาณ 4 - 5 ปี

## บทสรุป

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพของฉนวนใยแก้วพบว่า ฉนวนใยแก้วที่อัตราส่วน 1 : 1.2 : 8 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 367.01 kg/m<sup>3</sup> ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.16 W/m•K ใกล้เคียงกับฉนวนฟางข้าว และผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้งานฉนวนใยแก้วที่มีความหนา 1 cm สามารถนำไปใช้เก็บรักษาน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิ 35 - 40 °C เท่านั้น สำหรับความสามารถของความสามารถต้านทานความร้อนของฉนวนใยแก้วเปรียบเทียบกับฉนวนยางดำพบว่า มีค่าต่ำกว่าจึงทำให้มีค่าเฉลี่ยของการสูญเสียความร้อนสูงกว่าฉนวนยางดำ 14 - 35 % ดังนั้นหากจะทำการพัฒนาต่อไปควรเพิ่มค่าการต้านทานความร้อนของฉนวนใยแก้วให้มากขึ้น เช่น การเพิ่มส่วนผสมต่าง ๆ ที่สามารถประสานฉนวนได้ดีและมีค่าการนำความร้อนต่ำ เพื่อให้ใกล้เคียงกับฉนวนเชิงพาณิชย์ หรือการใช้งานที่อุณหภูมิร้อนที่สูงขึ้นควรใช้ฉนวนที่มีความหนาเพิ่มขึ้น และเนื่องจากการศึกษาฉนวนใยแก้วยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักควรมีการศึกษาเพิ่มเติมของการนำไปใช้งานจริง เช่น ค่าการจุดติดไฟ เป็นต้น และการนำฉนวนใยแก้วไปประยุกต์ใช้ในงานด้านความร้อนประเภทอื่น ๆ

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ผ่านการดำเนินงานของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยนี้

## References

- [1] Department of Alternative Energy and Development and Efficiency. (2016). *Energy Balance of Thailand 2015*. Access (12 February 2016). Available (<http://www.dede.go.th>)
- [2] Pakunworakij, T., Puthipiroj, P., Oonjittichai, W. and Tisavipat, P. (2006). Thermal Resistance Efficiency of Building Insulation Material from Agriculture Waste. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*. Vol. 4. No. 2. pp. 3-13
- [3] Taemthong, W. (2013). Rice Straw Insulation Sheet. *KKU Research Journal*. Vol. 18. No. 3. pp. 380-390
- [4] Apravate, C., Surin, P. and Wong-On, J. (2012). Study on Efficiency of Natural Fiber Insulation. In *Proceeding of IE NETWORK CONFERENCE 2012; Phetchaburi, Thailand*. pp. 1-4
- [5] Evona, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.Y. and Riga, L. (2014). New Thermal Insulation Fiberboards from Cake Generated during Biorefinery of Sunflower whole Plant in a Twin-screw Extruder. *Industrial Crops and Products*. Vol. 52. pp. 354-362
- [6] Manohar, K., Ramlakhan, D., Kochhar, G. and Halder, S. (2006). Biodegradable Fibrous Thermal Insulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 28. No. 1. pp. 45-47
- [7] ASTM International. (2016). *Standard Test Method for Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of Guarded Hot Plate Apparatus*. Access (12 February 2016). Available (<http://www.astm.org>)
- [8] Zarr, R.R. and Healy, W. (2002). Design Concepts for a New Guarded Hot Plate Apparatus for Use over an Extended Temperature Range. *ASTM International Standards, Insulation Materials, Testing and Applications*. Vol. 4. pp. 98-115
- [9] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. United State of America: John Willy & Sons
- [10] Jaturonglumlart, S. (2010). *Heat Transfer*. Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University. pp. 42-49
- [11] Pisujsiang, J. (2010). *Energy-Efficiency of Insulation produced from Rubber Leaf*. Field of Study Architecture, Department of Architecture, Graduate School, Chulalongkorn University.
- [12] Asdrubali, F., D'Alessandro, F. and Schiavoni, S. (2015). A Review of Unconventional Sustainable Building Insulation Materials. *Sustainable Materials and Technologies*. Vol. 4. pp. 1-17

- [13] Lertwattanakruk, P. and Suntijitto, A. (2015). Properties of Natural Fiber Cement Materials Containing Coconut Coir and Oil Palm Fibers for Residential Building Applications. *Construction and Building Materials*. Vol. 94. pp. 664-669