# การศึกษาแผ่นเซลล์กระดาษสาสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย

**สมชาย มณีวรรณ์** [1*]
มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก 65000
**และ ชัยวัฒน์ ยิ้มช้าง** [2]
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000

*รับเมื่อ 17 มกราคม 2550 ตอบรับเมื่อ 18 พฤษภาคม 2550*

## บทคัดย่อ

งานวิจัยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระดาษสาที่เป็นสินค้าทางการเกษตรที่หาง่ายและราคาถูก มาทำเป็นแผ่นเซลล์ทำความเย็นแบบระเหย, โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษสาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซึ่งทำการศึกษา (1) ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (ISO534:1988) (2) ค่าความต้านแรงดึงขาดสภาวะแห้งและสภาวะเปียก (ISO3781:1983), (3) น้ำหนักมาตรฐาน (ISO536:1995), (4) ค่าความหนาและ (5) ค่าความหนาแน่นของกระดาษสา (ISO534:1988), ใช้กระดาษสาจาก 3 แหล่งผลิต ประกอบด้วย บ้านนาเหลืองใน อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน (A), บ้านสะเนียน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน (B) และ บ้านเข็กใหญ่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก (C), เพื่อหากระดาษสาที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับผลิตแผ่นเซลล์ทำความเย็น

จากการศึกษาพบว่า กระดาษสาจากแหล่งผลิตเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพดังนี้, (1) การดูดซึมน้ำร้อยละ 220-390 ของน้ำหนักกระดาษสา, (2) ความต้านทานแรงดึงขาดสภาวะแห้ง 6 -17 กิโลนิวตัน/ตร.ม., (3) ค่าความต้านทานแรงดึงขาดสภาวะเปียก 0.4 - 1.3 กิโลนิวตัน/ตร.ม., (4)น้ำหนักมาตรฐาน 50 - 130 ก./ตร.ม., (5)ค่าความหนา 0.1 - 0.4 มม. และ (6) ค่าความหนาแน่น 300 - 390 กก./ม.$^3$ ขึ้นอยู่กับความหนาและแหล่งผลิต, จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ากระดาษสาจากบ้านเข็กใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสำหรับผลิตแผ่นเซลล์ทำความเย็นเนื่องจากมีราคาถูกและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับกระดาษสาแหล่งอื่นๆ, จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นทำความเย็นในอุโมงค์ลมตามมาตรฐาน ASHREAE 41.2-1987 (กxยxส 30x15x50 ซม.) (a) โดยปรับเปลี่ยนความเร็วลม 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ม./วินาทีและ (b) อัตราการไหลของน้ำ 0.03, 0.06, 0.15, 0.22 กก./วินาที, พบว่าที่ความเร็วลม 1.0 ม./วินาที และอัตราการไหลของน้ำ 0.03 กก./วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำความเย็นแบบระเหย, โดยแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผ่นเซลล์ทำความเย็นเชิงพาณิชย์ร้อยละ 67.10 และร้อยละ 68.33 ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสามีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าแผ่นเซลล์เชิงพาณิชย์ประมาณ 240 บาท/ตร.ม.

**คำสำคัญ :** กระดาษสา / สมบัติทางกายภาพ / แผ่นเซลล์ทำความเย็น / ระบบทำความเย็นแบบระเหย

---

**Corresponding auther: E-mail: somchaim@nu.ac.th*
*[1] อาจารย์ หน่วยวิจัยพลังงานทางด้านความร้อนและส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์*
*[2] อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์*

# The Study of Celpad from Mulberry Paper for Evaporative Cooling

**Somchai Maneewan** [1*]

Narasuan University, Phitsanulok 65000

**and Chaiwat Yimchang** [2]

Nakhon Sawan Rajabhat University, Amphur Muang, Nakhon Sawan 60000

*Received 17 January 2007 ; accepted 18 May 2007*

## Abstract

This research aims at studying the possibility of producing evaporative cooling cell pads by means of mulberry paper which is a low-cost agricultural products and easily available easily. The physical properties of mulberry paper, such as (1) water absorption (ISO534:1988), (2) tensile strength (ISO3781:1983), (3) basis weight (gramage) (ISO536:1995), (4) thickness and (5) density (ISO534:1988), were analyzed. The various sources of mulberry paper, Naloaeng, Wiangsa, Nan (A), Sanian ,Muang, Nan (B) and Kekyai, Nachornthai, Phitsanulok (C), were studied to find a suitable paper for producing the evaporative cooling cell pads.

The result of the study showed the physical properties of the paper from these sources as follows; (1) water absorption of 220-390 %, (2) dry tensile strength of 6 - 17 kN/m$^2$, (3) wet tensile strength of 0.4 - 1.3 kN/m$^2$, (4) basis weight (gram age) of 50 - 130 g/m$^2$ , (5) thickness of 0.1-0.4 mm and (6) density of 300 - 390 kg/m$^3$ depending upon the source and thickness. We have found that the paper from Kegyai, Amphur Nachornthai, Phitsanulok has physical properties suitable for producing cooling cells because it is cheaper and has the same value of water absorption as the others. Testing efficiency using, ASHREAE standard 41.2 - 1987 (width x length x height, 30x15x50 centimeters) by (a) varying the values of wind velocity from 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, to 2.5 m/s and (2) switching the water flow rate to 0.03, 0.06, 0.15, 0.22 kg/s, we found that a air flow rate of 1.0 m/s and a water flow rate of 0.03 kg/s was suitable for producing the evaporative cooling cell pads. The efficiency of the evaporative cooling cell pads from mulberry paper is closed to that of commercial cooling cell pads, 67.10 % and 68.33 % respectively.

Economically, the cost of a cell pad from mulberry paper is approximately 240 ฿/m$^2$, which is cheaper than those sold commercially.

**Keywords :** Mulberry Paper / Physical Properties / Cell Pad / Evaporative Cooling

---

**Corresponding auther: E-mail: somchaim@nu.ac.th*

[1] *Lecturer, Thermal Energy and Energy Conservation Promotion Research Unit, Physics Department.*

[2] *Lecturer, Physics Department.*

## 1. บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในสภาวะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งประกอบอาชีพเกษตรกรรมและปศุสัตว์เป็นหลักอาทิเช่น การทำนา การเลี้ยงสัตว์ ซึ่งรายได้ของประเทศส่วนใหญ่ได้มาจากการส่งออกผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและเนื้อสัตว์ต่างๆ โดยเฉพาะไก่เนื้อ ซึ่งพื้นที่มีการเลี้ยงไก่มากที่สุดของประเทศไทย [1]

ช่วงระยะ 2 ปี (พ.ศ. 2547) ที่ผ่านมาประเทศไทยมีกำลังการผลิตสัตว์ปีกลดลงประมาณ 80 ล้านตัว เนื่องจากประสบปัญหาไข้หวัดนกในสัตว์ปีก เมื่อเกิดการระบาดของโรคไข้หวัดนกทำให้ต้องมีการทำลายสัตว์ปีกในพื้นที่ที่มีการแพร่ระบาดเป็นจำนวนมากทำให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ปีกประสบปัญหาขาดทุน เพื่อเป็นการฟื้นฟูการเลี้ยงสัตว์ปีกของเกษตรกร รัฐบาลจึงประกาศมาตรการให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ปีกต่อไปต้องเลี้ยงสัตว์ปีกในโรงเรือนแบบปิด [2] โรงเรือนปิดส่วนใหญ่จะเป็นโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบระเหย (evaporative cooling) ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันในโรงเรือนแบบปิดและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถลดอุณหภูมิของโรงเรือนให้ใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมกับในการเลี้ยงไก่ ทำให้สัตว์ที่เลี้ยงไม่มีความเครียดหรือมีความเครียดน้อยทำให้สัตว์เจริญเติบโตได้ดีและได้ผลผลิตมากขึ้น [3] และคุ้มค่ากับการลงทุนเพราะระบบทำความเย็นแบบระเหยเป็นระบบที่มีหลักการทำงานง่าย เงินลงทุนไม่สูงมาก ระบบทำความเย็นแบบระเหยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนโดยทำให้อากาศร้อนมีอุณหภูมิลดลงโดยใช้น้ำทำให้เกิดการระเหยเป็นตัวกลางพาความร้อน

ลักษณะของโรงเรือนแบบปิดที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยจะเป็นโรงเรือนที่มีผนังปิดมิดชิดทุกด้าน ด้านหนึ่งของโรงเรือนมีแผ่นทำความเย็น cooling pad หรือแผ่นผิวเปียก (wetted media) ส่วนอีกด้านหนึ่งอยู่ที่อยู่ตรงข้ามมีพัดลมดูดอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสลมและการถ่ายเทอากาศที่ผ่านเข้ามาในโรงเรือนแบบปิด ในปัจจุบันแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ทำด้วยกระดาษชนิดพิเศษมีคุณสมบัติอมน้ำซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง

ประเทศไทยมีการนำระบบทำความเย็นแบบระเหยมาใช้ในโรงเรือนเลี้ยงสัตว์มานานกว่าสิบปีโดยเฉพาะฟาร์มเลี้ยงไก่แบบอุตสาหกรรม ต่อมาได้นำไปใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ชนิดอื่น เช่น โรงเรือนเลี้ยงสุกรและโรงเรือนเลี้ยงโคนม เป็นต้น

## 2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของกระดาษสาแต่ละแหล่งผลิต
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของแผ่นเซลล์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบระเหยโดยใช้กระดาษสาในการทำแผ่นเซลล์
3. ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยโดยใช้แผ่นเซลล์จากกระดาษสา
4. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตแผ่นเซลล์จากกระดาษสาของกลุ่มแม่บ้านกระดาษสาในพื้นที่ภาคเหนือ

## 3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัทมรัตน์ ศาสตร์สาระ และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาประสิทธิผลอิ่มตัวของแผ่นทำความเย็นแบบระเหยที่ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นตัวกลางผิวเปียกกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการใช้งานแล้วถูกเคลือบด้วย wet strength resin และสารกันเชื้อราเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและอายุการใช้งานตามลำดับ กระดาษหนังสือพิมพ์ดังกล่าวนำมาประกอบเป็นชุดแผ่นทำความเย็นแบบระเหยในลักษณะการต่อลอนติดกันเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก จากผลการทดลองที่ได้พบว่ากระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติมีประสิทธิผลทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบระเหยได้ใกล้เคียงกับกระดาษเซลลูโลสต้นแบบ แต่กระดาษหนังสือพิมพ์ยังมีขีดจำกัดในการใช้งานในกรณีคงสภาพของผิวเปียก ดังนั้น กระดาษหนังสือพิมพ์จึงมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นตัวกลางผิวเปียก ทั้งนี้ยังต้องทำการศึกษาทดลองต่อยอดในส่วนของการปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษหนังสือพิมพ์เพื่อให้มีความสามารถในการคงสภาพในการใช้งานจริงได้มากขึ้น

Dai, Y.J. and K. Sumathy [6] ได้ศึกษาทฤษฎีระบบทำความเย็น direct evaporative cooling แบบทางเดียวโดยใช้กระดาษอัดแน่นทำเป็นแผ่นรังผึ้งโดยคาดว่าจะสามารถลดความชื้นและสามารถสร้างความเย็นสบายใน

อาคารโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการของของเหลวที่ผิวสัมผัสตามเงื่อนไขที่ทำให้น้ำระเหยพบว่าอุณหภูมิที่สัมผัสแผ่นรังผึ้งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของช่องอากาศแผ่นรังผึ้งที่ทำให้อุณหภูมิลดต่ำสุดได้และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ อัตราการไหลของมวลของน้ำและอากาศที่ผ่านแผ่นรังผึ้ง

Giabakou, Z. and Ballinger, J.A., [7] ทำการทดลองที่เมืองนิวเซาท์เวล ซึ่งใช้ห้องขนาด 10 x 10 x 2.8 ม.$^3$ โดยที่ด้านทิศเหนือมีพื้นที่หน้าต่าง 11.2 ม.$^2$ และทิศใต้มีพื้นที่หน้าต่าง 2.8 ม.$^2$ ที่หน้าต่างทิศเหนือใช้ม่านน้ำซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. และแต่ละเส้นห่างกัน 9 มม. พบว่าที่ความเร็วลม 2.8 ม./วินาที สามารถลดอุณหภูมิในห้องลงได้สูงสุดประมาณ 12 °ซ โดยภายในห้องมีความชื้นร้อยละ 73.2

Peterson, J.L., and Hunn, B.D., [8] ได้ทำการทดสอบระบบ indirect evaporative cooling โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าระบบกับอากาศที่ออกจากระบบ ซึ่งกำหนดให้อากาศเข้าระบบที่ 2,667 ลูกบาศก์ฟุตต่อเมตร และอุณหภูมิของอากาศ 35 °ซ และปรับอัตราการไหลของอากาศที่ระบายออกด้วยอัตรา 500 ลูกบาศก์ฟุตต่อเมตร ถึง 2,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อเมตร จะทำให้ลดอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 23 °ซ ถึง 29 °ซ

## 4. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระดาษสาเพื่อนำมาทำเป็นแผ่นเซลล์ทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบระเหยที่ใช้ในโรงเรือนแบบปิด โดยจะทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษสาเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาเป็นแผ่นทำความเย็น จากนั้นนำกระดาษสามาทำเป็นแผ่นเซลล์ทำความเย็นแล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นกับแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป โดยใช้อุโมงค์ลมทดสอบตามมาตรฐานของ ASHRAE 41.2-1987

### 4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากมีกลุ่มผู้ผลิตกระดาษสาในพื้นที่ภาคเหนืออยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงสุ่มเลือกแหล่งผลิตจากแหล่งผลิตกระดาษสาที่มีขนาดปานกลางไปจนถึงขนาดใหญ่เพื่อเป็นตัวอย่างในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ กระดาษสาที่นำมาทดสอบสมบัติกายภาพนั้นเป็นกระดาษสาที่ไม่มีการเติมสีหรือลวดลายแสดงดังรูปที่ 1 จากการสุ่มเลือกในงานวิจัยนี้จะเลือกกระดาษสาจาก 3 แหล่งผลิตโดยแบ่งเป็นเบอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

1. กลุ่มกระดาษสาและผลิตภัณฑ์จากกระดาษสาบ้านนาเหลืองใน 159 หมู่ 1 บ้านนาเหลืองใน ต.นาเหลือง อ.เวียงสา จ.น่าน โดยแบ่งเป็นเบอร์ 1 (A1), เบอร์ 2 (A2), เบอร์ 3 (A3)

2. กลุ่มแม่บ้านบ้านสะเนียน 126 หมู่ 2 บ้านสะเนียน ต.สะเนียน อ.เมือง จ.น่าน โดยแบ่งเป็นเบอร์ 0 (B0), เบอร์ 1 (B1), เบอร์ 2 (B2)

3. กลุ่มสหกรณ์กระดาษสาบ้านเซ็กใหญ่ 689 หมู่ 4 บ้านเซ็กใหญ่ ต.บ้านแยง อ.นครไทย จ.พิษณุโลก โดยแบ่งเป็นเบอร์ดังนี้ เบอร์ 1 (C1), เบอร์ 2 (C2)

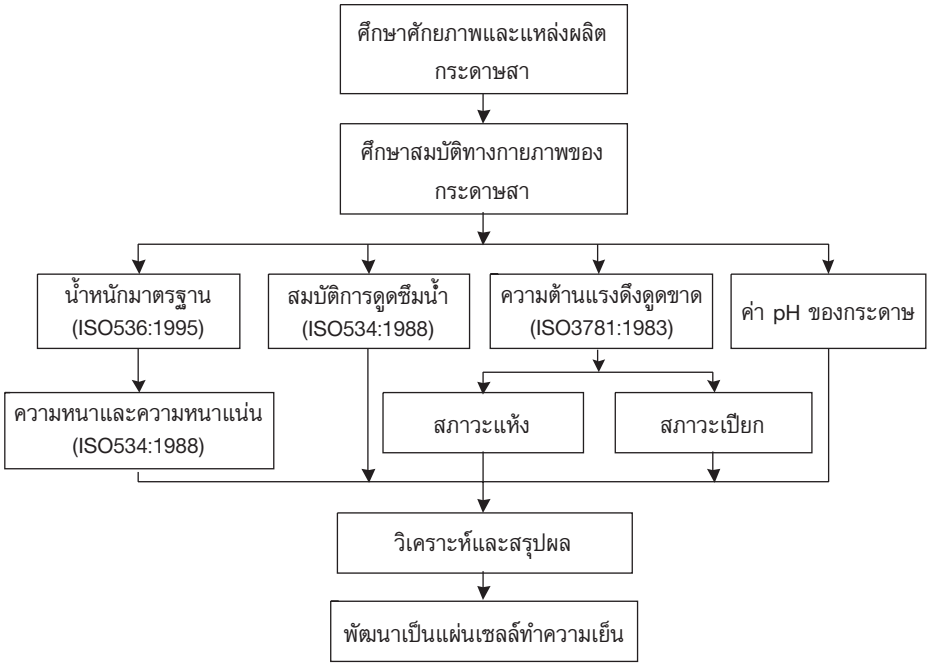
**รูปที่ 1** กระดาษสาตัวอย่าง

### 4.2 วิธีการทดสอบ

#### 4.2.1 วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษสา

การทดสอบสมบัติทางกายภาพเพื่อให้ทราบข้อมูลพื้นฐานของกระดาษสาที่มีกลุ่มผู้ผลิตอยู่เป็นจำนวนมาก โดยทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วย ความสามารถใน

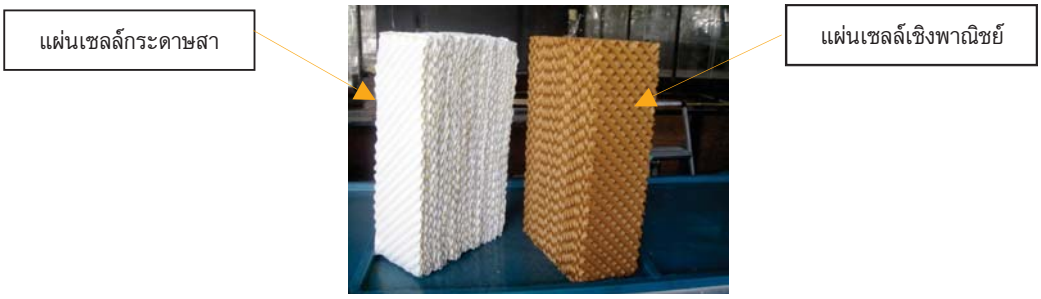
การดูดซึมน้ำ (ISO 534:1988) ค่าความต้านแรงดึงขาด (ISO 3781:1983) น้ำหนักมาตรฐาน (ISO 536:1995) ค่าความหนาและค่าความหนาแน่นของกระดาษสา (ISO 534:1988) ตลอดจนศึกษาแหล่งผลิต ปริมาณการผลิตกระดาษสาและราคาของกระดาษสาตามท้องตลาด ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 2



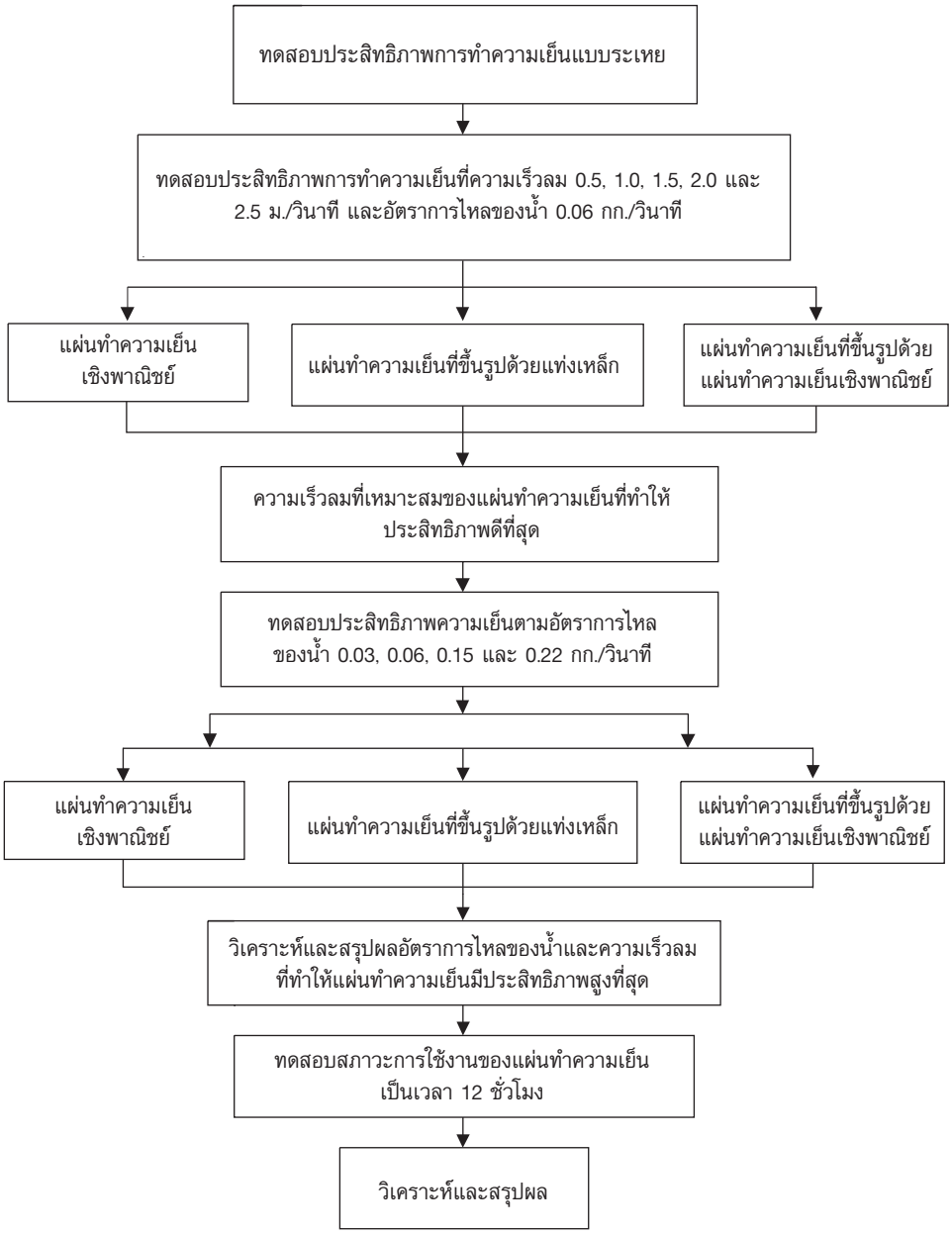

**รูปที่ 2** ขั้นตอนการทดสอบทางกายภาพของกระดาษสา

#### 4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบระเหย

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยจะทำการทดสอบแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาและแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ ขนาด 30x15x50 ซม.$^3$ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะการขึ้นรูปคือ แผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ใช้การขึ้นรูปลอนโดยใช้แผ่นทำความเย็นกระดาษเชิงพาณิชย์เป็นต้นแบบ กับแผ่นทำความเย็นที่ใช้แท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 ซม. ยาว 20 ซม. โดยมีมุมน้ำและมุมลมที่เท่ากับกระดาษเชิงพาณิชย์

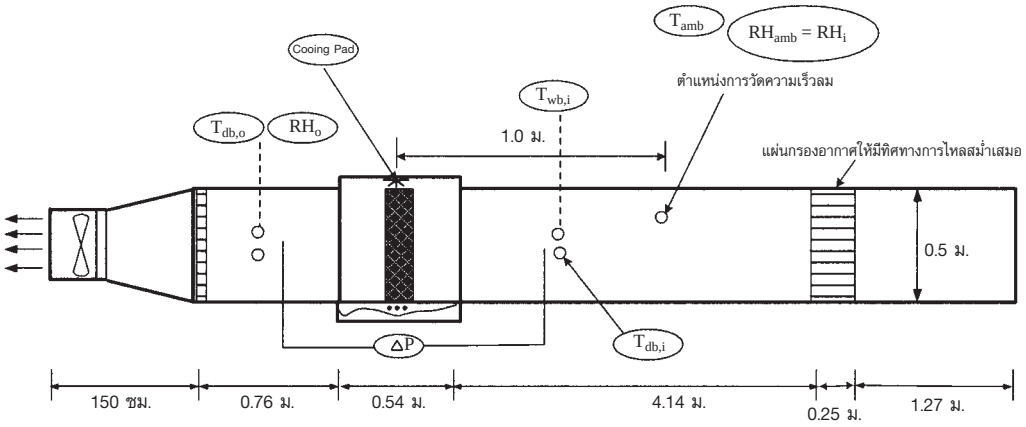



**รูปที่ 3** แผ่นทำความเย็นจากกระดาษสากับแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพ




**รูปที่ 4** ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบระเหย

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยอุโมงค์ลมตามมาตรฐาน ASHRAE 41.2-1987 เพื่อวัดความดันตกคร่อม (pressure drop) ระหว่างแผ่นเซลล์ทำความเย็น อุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนและหลังผ่านแผ่นเซลล์ทำความเย็น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม เพื่อนำตัวแปรต่างๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย (effectiveness of evaporative cooler; $\varepsilon_{ev}$)




**รูปที่ 5** ตำแหน่งการวัดข้อมูลในอุโมงค์ลมทดสอบ

เมื่อ

$T_{db,i}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนผ่านเซลล์ทำความเย็น (°ซ)

$T_{wb,i}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนผ่านเซลล์ทำความเย็น (°ซ)

$T_{db,o}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านเซลล์ทำความเย็น (°ซ)

$T_{amb}$ คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°ซ)

$RH_{amb}$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (ร้อยละ)

$RH_i$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนผ่านแผ่นเซลล์ทำความเย็น (ร้อยละ)

$RH_o$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังผ่านแผ่นเซลล์ทำความเย็น (ร้อยละ)

$\Delta P$ คือ ความดันตกคร่อมแผ่นทำความเย็น ($mmH_2O$)

$RH_i = RH_{amb}$

#### 4.2.3 สมการในการคำนวณประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย

$$\varepsilon_{ev} = \frac{T_{db,i} - T_{db,o}}{T_{db,i} - T_{wb,i}}$$

เมื่อ

$\varepsilon_{ev}$ คือ ประสิทธิภาพการทำความเย็น (ร้อยละ)

$T_{db,i}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนผ่านผิวเปียก (°ซ)

$T_{db,o}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านผิวเปียก (°ซ)

$T_{wb,i}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศหลังผ่านผิวเปียก (°ซ)

## 5. ผลการวิจัยและวิเคราะห์

### 5.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษสาแสดงได้ดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าความหนาจะพบว่ากระดาษสามีค่าความหนาตามขนาดของเบอร์ โดยตัวเลขเบอร์น้อยจะหนามากกว่ากระดาษสาตัวเลขเบอร์มาก และเมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำจะพบว่ากระดาษสาในแต่ละเบอร์มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 225 - 338 ขึ้นอยู่กับความหนาและความหนาแน่นของกระดาษสา ซึ่งสามารถสรุปสมบัติทางกายภาพของกระดาษสาได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งสมบัติต่างๆ จะแตกต่างกันในแต่ละแหล่งผลิต

**ตารางที่ 1** สรุปผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษตามแหล่งผลิต

| สมบัติทางกายภาพ | แหล่งผลิต | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | บ้านสะเนียน | | | บ้านนาเหลืองใน | | | เซ็กใหญ่ | |
| | A1 | A2 | A3 | B0 | B1 | B2 | C1 | C2 |
| ความหนา (มม.) | 0.34 | 0.27 | 0.14 | 0.37 | 0.36 | 0.35 | 0.35 | 0.19 |
| น้ำหนัก (ก./ม.$^2$) | 117.48 | 84.38 | 51.16 | 127.60 | 125.60 | 124.72 | 132.80 | 75.92 |
| ความหนาแน่น (กก./ม.$^3$) | 367.13 | 310.22 | 300.94 | 338.46 | 348.89 | 350.40 | 379.43 | 387.35 |
| การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) | 338.57 | 288.48 | 230.48 | 368.84 | 371.42 | 365.20 | 349.12 | 225.39 |
| ค่าแรงดึงขาด ในสภาวะแห้ง (กิโลนิวตัน/ม.) | 11.78 | 8.69 | 7.94 | 16.51 | 16.81 | 12.61 | 13.86 | 6.78 |
| ค่าแรงดึงขาดใน สภาวะเปียก (กิโลนิวตัน/ม.) | 0.78 | 0.63 | 0.42 | 0.74 | 1.08 | 0.76 | 0.97 | 0.47 |
| ราคา (บาท/แผ่น) | 8.00 | 7.00 | 6.00 | 9.00 | 8.50 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นจากแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสา โดยเลือกกระดาษสาจากกลุ่มสหกรณ์กระดาษสาบ้านเซ็กใหญ่ เบอร์ 1 (C1) อ.นครไทย จ.พิษณุโลก เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพดีและมีราคาถูกกว่ากระดาษสาจากแหล่งผลิตอื่น ดังแสดงในตารางที่ 1

### 5.2 การออกแบบแผ่นทำความเย็นจากจากกระดาษสา

ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบแผ่นเซลล์กระดาษสาแต่ละแผ่นให้มีการขึ้นรูป 2 รูปแบบ ก่อนนำมาประกอบเป็นแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสา ขนาด 30x50x15 ซม.$^3$ เพื่อให้มีขนาดพอดีกับชุดทดสอบในอุโมงค์ลม

### 5.3 การขึ้นรูปกระดาษสาวิธีที่ 1 ขึ้นรูปจากแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์

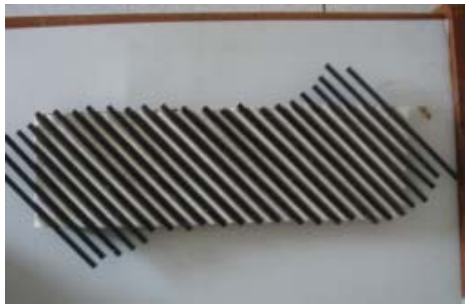
แผ่นกระดาษสาที่นำมาขึ้นรูปจะมีขนาด กว้าง 55 ซม. ยาว 80 ซม.

1. ตัดกระดาษสาตามยาว ขนาดความกว้างประมาณ 18 ซม. โดยกระดาษสา 1 แผ่นจะตัดได้จำนวน 3 ชิ้น

2. นำกระดาษสาจุ่มน้ำให้ทั่วทั้งแผ่นแล้วยกขึ้นทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที

3. นำกระดาษสาไปวางบนแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ แล้วใช้แท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 ซม. ยาว 20 ซม. วางทับดังรูปที่ 6 และ 7

**รูปที่ 6** แผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการขึ้นรูป



**รูปที่ 7** การวางกระดาษบนแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์

4. นำไปผึ่งแดดให้แห้งสนิทแล้วตัดให้มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ยาว 50 ซม.

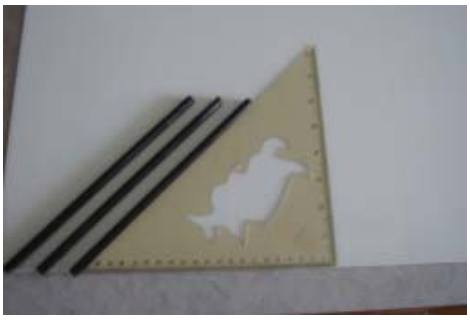
5. นำมาประกอบเป็นแผ่นทำความเย็นโดยใช้กาวสังเคราะห์ยึดติดให้มีขนาดความหนา 29 ซม.

### 5.4 การขึ้นรูปกระดาษสาวิธีที่ 2 ขึ้นรูปจากแท่งเหล็ก

1. ตัดกระดาษสาตามยาว ขนาดความกว้างประมาณ 18 ซม. โดยกระดาษสา 1 แผ่นจะตัดได้จำนวน 3 ชิ้น

2. นำกระดาษสาจุ่มน้ำให้ทั่วทั้งแผ่นแล้วยกขึ้นทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที

3. นำกระดาษสาไปวางบนแท่งเหล็กโดยวางแท่งเหล็กสลับบน-ล่างของกระดาษสา โดยใช้บรรทัดสามเหลี่ยมกำหนดมุม ดังรูปที่ 8



(ก) การกำหนดมุมแท่งเหล็ก 45°

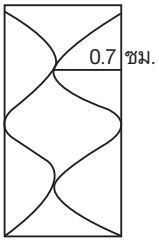
(ข) การวางแท่งเหล็กบนกระดาษสา

**รูปที่ 8** การกำหนดมุมแท่งเหล็กและการวางแท่งเหล็กบนกระดาษสา

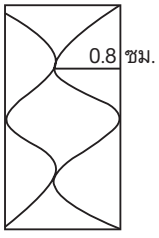
4. นำไปผึ่งแดดให้แห้งสนิทแล้วตัดให้มีขนาดความกว้าง 15 ซม. ยาว 50 ซม.

5. นำมาประกอบเป็นแผ่นทำความเย็นโดยใช้กาวสังเคราะห์ยึดติดให้มีขนาดความหนา 29 ซม.

ข้อแตกต่างระหว่างการขึ้นรูปวิธีที่หนึ่งและวิธีที่สองคือ วิธีที่สองจะได้ขนาดของลอนมุมน้ำและมุมลมใหญ่กว่าแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ประมาณ 0.1 ซม. ดังรูปที่ 9 และ 10




(ก) ขนาดลอนเชิงพาณิชย์




(ข) ขนาดลอนที่ขึ้นรูปด้วยแท่งเหล็ก

**รูปที่ 9** ความแตกต่างระหว่างขนาดลอนของแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์กับขนาดลอนของแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ใช้การขึ้นรูปจากแท่งเหล็ก

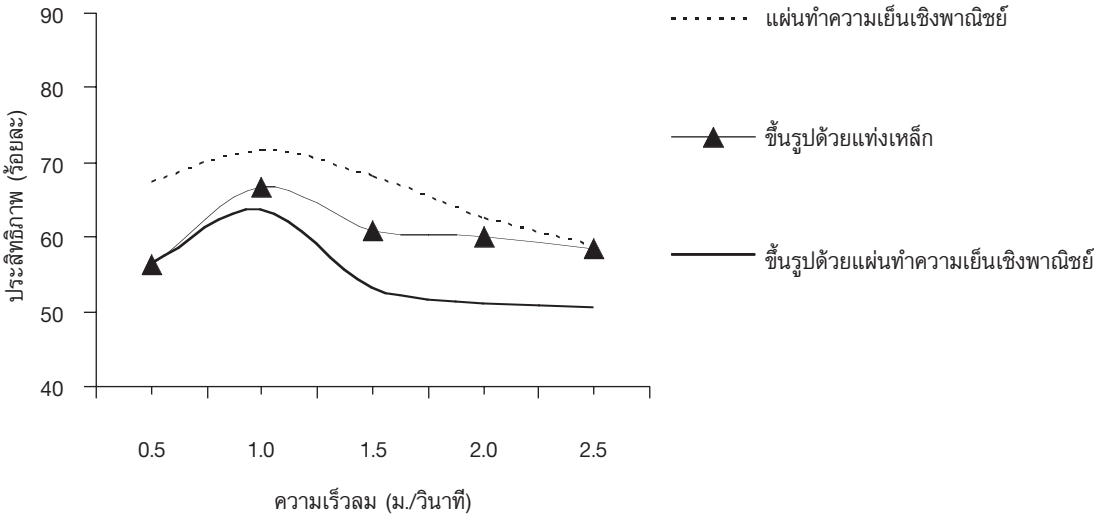
**5.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย**

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยปรับเปลี่ยนความเร็วลม

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยจะทำการทดสอบแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ แผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปจากแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ และแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยแท่งเหล็ก ควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นทำความเย็นที่ 0.03 กก./วินาที ปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, และ 2.5 ม./วินาที โดยทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ทุกแผ่นทำความเย็น ใช้เวลาการทดสอบ 30 นาที

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยปรับเปลี่ยนความเร็วลมพบว่าที่ความเร็วลม 1.0 ม./วินาที เป็นความเร็วลมที่เหมาะสมเนื่องจากทำให้แผ่นทำความเย็นมีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีที่สุด ดังรูปที่ 10

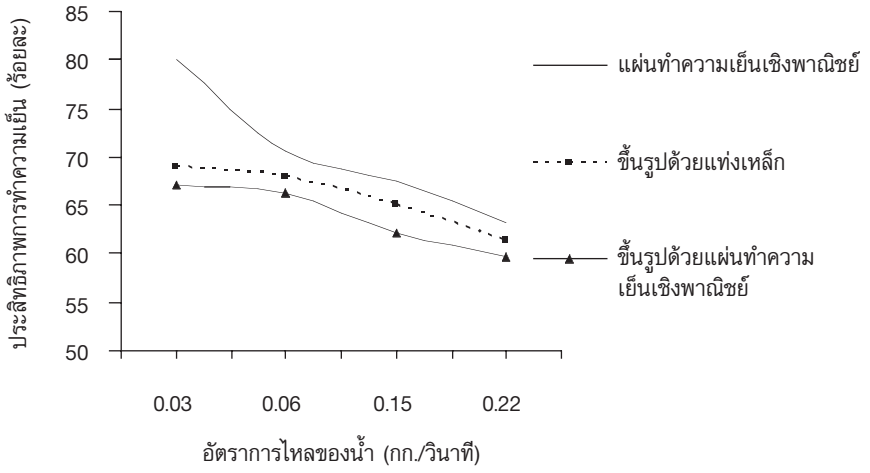



**รูปที่ 10** กราฟผลการทดสอบประสิทธิผลการทำความเย็นตามความเร็วลม

2. การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ

จากผลการทดสอบของความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพของแผ่นทำความเย็นพบว่าที่ความเร็วลม 1 ม./วินาที มีความเหมาะสม เนื่องจากประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดร้อยละ 71.67 ดังนั้นจึงได้ทดสอบผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น โดยใช้ความเร็วลม 1 ม./วินาที เวลาในการทดสอบแผ่นทำความเย็นแต่ละแบบแต่ละอัตราการไหลของน้ำเป็นเวลานาน 30 นาที และทำการเก็บข้อมูลทุก 1 นาที

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นตามอัตราการไหลของน้ำพบว่า อัตราการไหลของน้ำ 0.03 กก./วินาที ประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นทำ ความเย็นทั้งสามแบบจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด ดังรูป ที่ 11

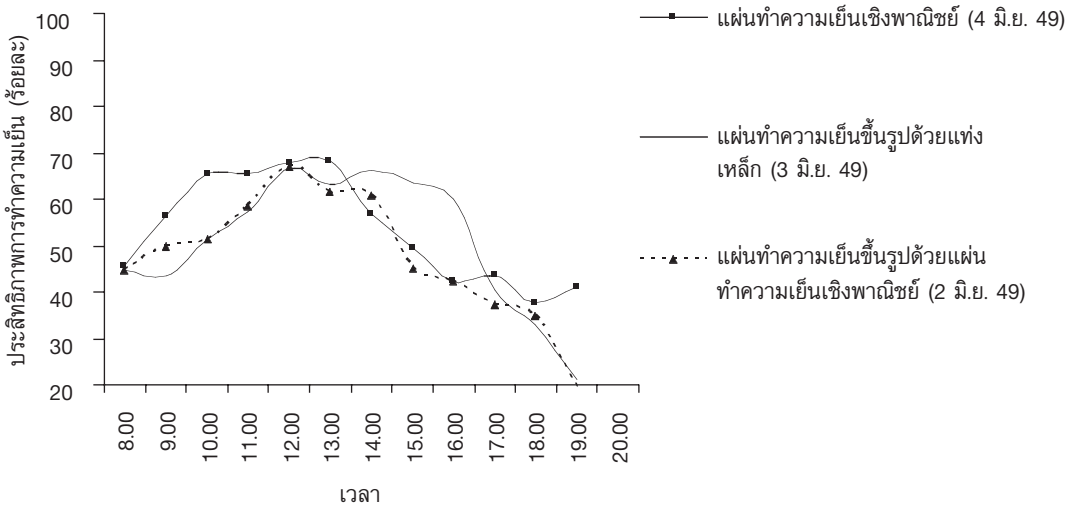



**รูปที่ 11** กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นตามอัตราการไหลของน้ำ

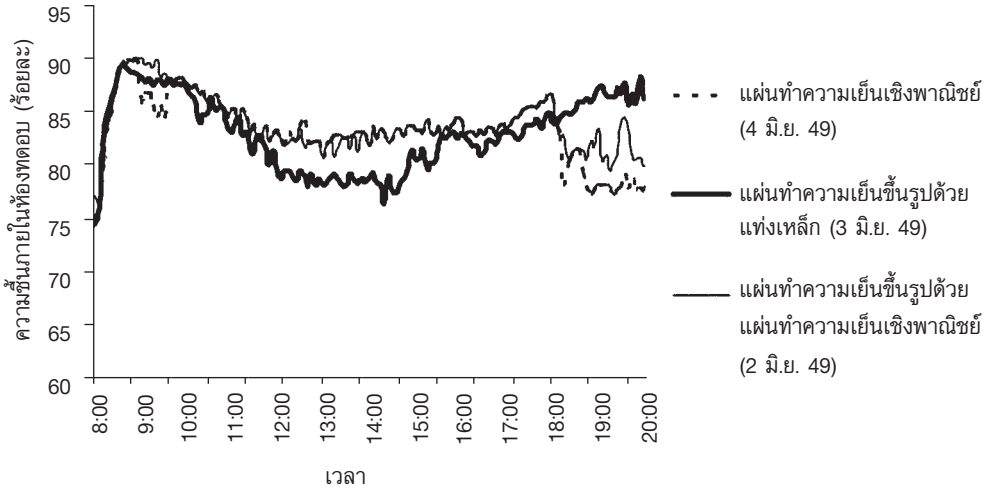
3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นที่สภาวะการใช้งานของแผ่นทำความเย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยทำการทดสอบสภาวะการใช้งานตลอดทั้งวัน เนื่องจากแผ่นทำความเย็นที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบระเหยต้องมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งในแต่ละวัน มีอากาศที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบแผ่นทำความเย็นโดยการใช้งาน โดยใช้ความเร็วลม 1.0 ม./วินาที และอัตราการไหลน้ำ 0.03 กก./วินาที ซึ่งทำให้แผ่นทำความเย็นมีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีสูงสุด การทดสอบสภาวะการใช้งานเวลาทดสอบ 12 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำความเย็นทุก 5 นาที อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบระเหย ดังนั้นในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นต้องพิจารณาว่าอุณหภูมิแวดล้อมใกล้เคียวกัน

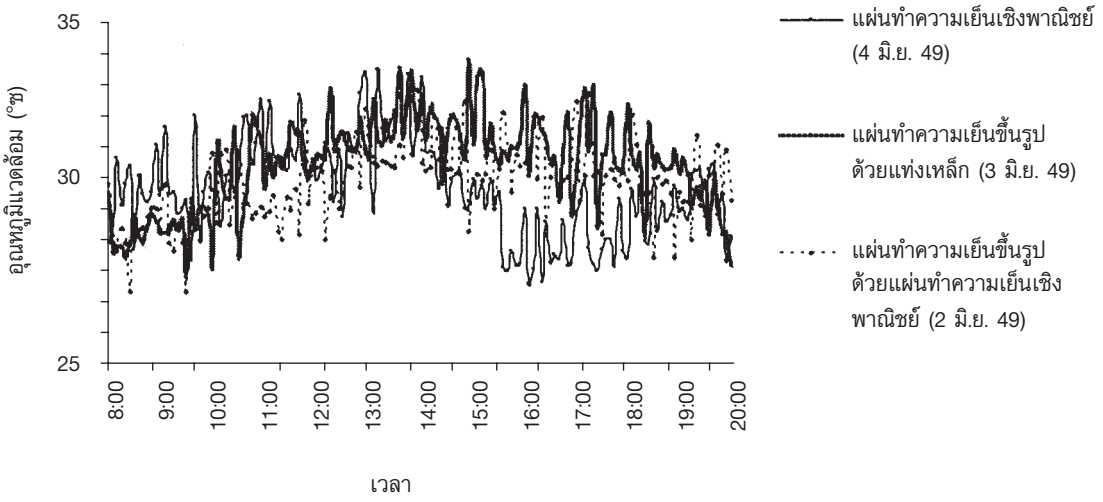
ผลการทดสอบแผ่นทำความเย็นโดยการทดสอบที่สภาวะการใช้งานเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมในวันทดสอบใกล้เคียงกัน ซึ่งอุณหภูมิประมาณ 28-31°ซ ประสิทธิภาพการทำความเย็นประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพโดยประมาณร้อยละ 53.38 แผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยแท่งเหล็กมีประสิทธิภาพโดยประมาณร้อยละ 50.95 และแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพโดยประมาณร้อยละ 47.77 ตามลำดับ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในของการทำความเย็นแบบระเหยของแผ่นทำความเย็นทั้ง 3 แบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงร้อยละ 80 ถึง 85 ดังแสดงรูปที่ 12, 13, 14 ทั้งนี้อาจเนื่องจากกระดาษที่ใช้ทำแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพจนมีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำมาทำแผ่นทำความเย็นมากกว่ากระดาษสา จึงทำให้มีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงกว่าและแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยแท่งเหล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า




**รูปที่ 12** กราฟแสดงประสิทธิภาพของแผ่นทำความเย็นที่ทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง




**รูปที่ 13** กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง




**รูปที่ 14** กราฟแสดงอุณหภูมิแวดล้อมของแผ่นทำความเย็นที่ทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

## 6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ของแผ่นเซลล์กระดาษสาสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหยเพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพกระดาษสาและนำข้อมูลมาใช้ในการทำเป็นแผ่นทำความเย็น โดยทำการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงดึงขาด น้ำหนักมาตรฐาน ความหนาและความหนาแน่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ISO 3781 : 1983, ISO 534 : 1988, ISO 535 : 1991, และ ISO 536:1995 ซึ่งใช้กระดาษสาจาก 3 แหล่งผลิต ประกอบด้วย บ้านนาเหลือง ในอำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน (A), บ้านสะเนียน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน (B) และ บ้านแยง อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก (C) จากนั้นนำกระดาษสามาเป็นแผ่นทำความเย็น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นเปรียบเทียบกับแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์เพื่อหาความเร็วลมและอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมสำหรับทำความเย็นแบบระเหย จากนั้นนำแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาและแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ไปทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นในสภาวะการใช้งานตลอดวัน และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์กระดาษสา พบว่า

1. กระดาษสาแต่ละแหล่งผลิตมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันและไม่สามารถนำค่าสมบัติทางกายภาพของแหล่งผลิตหนึ่งไปอ้างอิงสมบัติทางกายภาพของอีกแหล่งหนึ่งได้ จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า กระดาษสามีค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 220-370 สามารถทำเป็นแผ่นทำความเย็นได้โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นของกระดาษสา 300-390 กก./ม.$^3$ ความต้านทานแรงดึงขาดสภาวะแห้ง 6 -17 กิโลนิวตัน/ม.$^2$ และค่าความต้านทานแรงดึงขาดสภาวะเปียก 0.4-1.3 กิโลนิวตัน/ม.$^2$

2. แผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาสามารถทำได้โดยการนำกระดาษสามาขึ้นรูปด้วยแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์แล้วนำมาประกอบเป็นแผ่นทำความเย็นหรือในกรณีที่ไม่สามารถหาแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ได้ก็สามารถใช้แท่งเหล็กขนาด 0.8 ซม. มาขึ้นรูปได้ โดยจะได้ขนาดลอนใหญ่กว่าแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ประมาณ 0.1 ซม.

3. ผลการทดสอบแผ่นทำความเย็นขนาด 30x50x15 ม.$^3$ ความเร็วของลมและอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย คือ ความเร็วลม 1.0 ม./วินาที และอัตราการไหลของน้ำ 0.03 กก./วินาที เนื่องจากแผ่นทำความเย็นมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ 71 ในการจำลองสภาวะการใช้งานตลอดวัน แผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ร้อยละ 68.33 แผ่นทำความเย็นที่ขึ้นรูปจากแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 67.10 และแผ่นทำความเย็นที่ขึ้นรูปจากแท่งเหล็กมีประสิทธิภาพร้อยละ

66.18 ซึ่งจะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันน้อยมาก

4. มีความเป็นได้ในการนำแผ่นกระดาษสามาผลิตเป็นแผ่นเซลล์ทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบระเหย จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแผ่นทำความเย็นจากกระดาษสาเบื้องต้นพบว่ามีต้นทุนการผลิตต่อแผ่นต่ำกว่าแผ่นทำความเย็นเชิงพาณิชย์ ประมาณ 240 บาท/ม.$^2$

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เครือข่ายภาคเหนือตอนล่าง สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. สถิติข้อมูลการปศุสัตว์, มปป., *สถิติสัตว์ปีกในประเทศไทย*, สืบค้นเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2548 จาก: http://www.dld.go.th/ict/yearly/yearly47/yearly47.html

2. กรมปศุสัตว์, ตุลาคม 47, *ความรู้ คำแนะนำ มาตรการเกี่ยวกับสถานการณ์โรคไข้หวัดนก*, สืบค้นเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม 2548 จาก: http://www.dld.go.th

3. วิวัฒน์ ชวนะนิกุล, 15 พฤศจิกายน 2547, *ระบบทำความเย็นแบบระเหยของน้ำในโรงเรือนแบบปิด*, สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2548 จาก: http://www.tsvs.or.th

4. ปัทมรัตน์ ศาสตร์สาระ และ คณะ, 2547, *ประสิทธิผลอิ่มตัวของแผ่นทำความเย็นแบบระเหยที่ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นตัวกลางผิวเปียก*, วิทยานิพนธ์ วศม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

5. ศิริชัย เทพา, 2539, *ความเป็นไปได้ในการทำความเย็นแบบระเหยสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดหอม*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

6. Y.J. Dai, K. Sumathy, 2002, *Theoretical Study on a Cross-flow Direct Evaporative Cooler using Honeycomb Paper as Packing Material*, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong.

7. Giabakou, Z., & Ballinger, J.A., 1996, *A Passive Evaporative Cooling System by Natural Ventilation*, Elsevier, Oxford, ROYAUME-UNI (1976) : Building and Environment.

8. Peterson, J.L., & Hunn, B.D., 1988, *Experimental Performance of an Indirect Evaporative Cooler*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, New York: ASHARE Transaction.