



ผลของความหยาบผิววัสดุผิวซีที่มีต่อประสิทธิภาพลื่นตัวสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย

โดย

นายศุภณัฐ แต่งเจริญสุข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของความหยาบผิววัสดุพีวีซีที่มีต่อประสิทธิภาพลื่นตัวสำหรับระบบทำความเย็นแบบ

ระเหย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE EFFECT OF PVC ROUGHNESS SATURATION EFFICIENCY FOR EVAPORATIVE  
COOLING SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Engineering ENERGY ENGINEERING  
Department of MECHANICAL ENGINEERING  
Academic Year 2024  
Copyright of Silpakorn University

|                      |                                                                                       |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อ               | ผลของความหยาบผิววัสดุพีวีซีที่มีต่อประสิทธิภาพลื่นตัวสำหรับ<br>ระบบทำความเย็นแบบระเหย |
| โดย                  | นายศุภณัฐ แต่งเจริญสุข                                                                |
| สาขาวิชา             | วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2                                                         |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์                                           |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ  
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

|                                               |                                                  |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| .....                                         | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ<br>เทคโนโลยีอุตสาหกรรม |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลิขิจำเนียร)  |                                                  |
| พิจารณาเห็นชอบโดย                             |                                                  |
| .....                                         | ประธานกรรมการ                                    |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระนุช อินทะกัณฑ์)   |                                                  |
| .....                                         | อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก                             |
| (รองศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์) |                                                  |
| .....                                         | ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก                              |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร คำแดง)         |                                                  |

650920010 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : ระบบทำความเย็นแบบระเหย, ประสิทธิภาพอัดตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, แผ่นผิวเปียกเซลล์ูโลส, ค่าความหยาดผิว

นาย ศุภณัฐ แด่งเจริญสุข: ผลของความหยาดผิววัสดุพีวีซีที่มีต่อประสิทธิภาพอัดตัวสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. นิติพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผิวเปียกจากพีวีซีผิวหยาด เพื่อนำไปเปรียบเทียบและทดแทนกับผิวเปียกเชิงการค้าเซลล์ูโลสที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันในระบบทำความเย็นแบบระเหย พีวีซีผิวหยาดในทอมไร้น่วยเป็นค่าความหยาดผิวต่อความยาวแผ่นพีวีซีจำนวน 4 ค่า คือ 0.884, 1.97, 2.15 และ 3.07 หลังจากนั้นนำแผ่นผิวเปียกพีวีซีมาขึ้นรูปจำนวน 35 แผ่น มีพื้นที่ผิวสัมผัส 2.8 ตารางเมตร และนำไปทดสอบที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 30 – 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 65% ที่ความเร็วอากาศสุขสบาย 0.25 เมตร/วินาที และอัตราการไหลของน้ำ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่าผิวเปียกพีวีซีที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที จะมีประสิทธิภาพอัดตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำเนื่องจากผิวยังไม่อึดตัวด้วยน้ำ แต่หลังจากอัตราการไหลน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะมีประสิทธิภาพอัดตัวสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผิวเปียกอึดตัวด้วยน้ำแล้ว และจะมีประสิทธิภาพอัดตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดีที่สุดที่ผิวหยาด 3.07 และเมื่อนำผิวเปียกพีวีซีผิวหยาด 3.07 มาเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้าเซลล์ูโลสจะพบว่ามีประสิทธิภาพอัดตัวดีกว่าเล็กน้อย และจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสใกล้เคียงกัน หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าผิวเปียกจากพีวีซีที่มีความหยาดผิวเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนผิวเปียกเชิงการค้าเซลล์ูโลสที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ในแง่ของประสิทธิภาพอัดตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ดีกว่า และยังทนทาน ง่ายต่อการทำความสะอาดอีกด้วย

650920010 : Major ENERGY ENGINEERING

Keyword : Evaporative Cooling System; Saturated Efficiency; Convective Heat Transfer Coefficient; Cellulose Pad; Surface Roughness

MR. Supanut TAENGCHAROENSUK : The Effect of PVC Roughness Saturation Efficiency for Evaporative Cooling System Thesis advisor : Associate Professor Dr. Nitipong Soponpongpiat

The objective of this research was to investigate the use of roughness PVC as a wet media to compare with cellulose pad in evaporative cooling systems. Rough-surfaced PVC in dimensionless terms has four values of surface roughness per unit length of the PVC sheet: 0.884, 1.97, 2.15, and 3.07. A 35 PVC sheets were fabricated, each with a contact surface area of 2.8 square meters, and tested under inlet air temperatures of 30–35°C, relative humidity of 55–65%, air velocity of 0.25 m/s, and water flow rates of 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6 kg/s. The experimental results showed that PVC wet media with a water flow rate of 0.2 kg/s exhibited low saturation efficiency and convective heat transfer coefficients due to insufficient water saturation. However, at water flow rates of 0.3 – 0.6 kg/s, saturation efficiency improved significantly because the wetting surface became fully saturated. The highest saturation efficiency and convective heat transfer coefficients were observed on surfaces with a roughness of 3.07. When comparing PVC wet media with a roughness of 3.07 to commercial cellulose wet media, the PVC media showed slightly better saturation efficiency, while the heat transfer coefficient multiplied by the contact surface area is similar. The analysis concludes that rough PVC wet media are suitable replacements for commercial cellulose wet media, offering superior saturation efficiency, higher convective heat transfer coefficients, greater durability, and easy for cleaning.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับการดูแลเอาใจใส่ และคำแนะนำอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ รองศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์และนอกจากนี้ยังได้รับคำแนะนำให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและให้ข้อเสนอแนะจากกรรมการอีกหนึ่งท่าน คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกัณท์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างถึงความกรุณาของอาจารย์ทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง ท่านอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ซึ่งให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิผู้เชี่ยวชาญ ที่สละเวลาในการตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ตรวจทานความถูกต้องของภาษาในการจัดพิมพ์เล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับความช่วยเหลือและกำลังใจจากคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้วิจัยไม่อาจกล่าวนามได้หมด ผู้วิจัยรู้สึกขอบคุณในความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณมาไว้ ณ โอกาสนี้

ศุภณัฐ แต่งเจริญสุข



## สารบัญ

|                                                                        | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                   | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                            | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                       | ญ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                      | ฎ    |
| บทที่ 1.....                                                           | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....                                        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                       | 3    |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....                                             | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                     | 4    |
| บทที่ 2.....                                                           | 5    |
| 2.1 ระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System).....           | 5    |
| 2.2 คุณสมบัติของอากาศชื้น.....                                         | 8    |
| 2.3 แผนภูมิไครโครเมตริก (Psychrometric chart).....                     | 10   |
| 2.4 การถ่ายเทความร้อน.....                                             | 14   |
| 2.5 กระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น.....                           | 18   |
| 2.6 การทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative cooling).....                   | 19   |
| 2.7 หลักการของกระบวนการอะเดียเบติก (Adiabatic Saturation Process)..... | 19   |
| 2.8 ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหย.....                          | 23   |
| 2.9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....                                 | 24   |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบระเหย .....                            | 26  |
| 2.11 การวัดความหยาบผิว .....                                                         | 29  |
| 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                     | 31  |
| บทที่ 3 .....                                                                        | 41  |
| 3.1 แผนการดำเนินงาน .....                                                            | 41  |
| 3.2 วิธีการดำเนินงาน .....                                                           | 42  |
| 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ .....                                                            | 44  |
| 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....                                              | 54  |
| บทที่ 4 .....                                                                        | 57  |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ .....                                 | 57  |
| 4.2 คุณลักษณะการทำความเย็นของแผ่นพีวีซีเมื่อใช้งานเป็นผิวเปียก .....                 | 61  |
| 4.3 การเปรียบเทียบผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า ..... | 76  |
| บทที่ 5 .....                                                                        | 80  |
| 5.1 คุณลักษณะของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ .....                                       | 80  |
| 5.2 การทดสอบคุณลักษณะการทำความเย็นของพีวีซีเมื่อใช้เป็นผิวเปียก .....                | 80  |
| 5.3 การเปรียบเทียบผิวเปียกพีวีซีกับผิวเชิงการค้า .....                               | 81  |
| 5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต .....                                         | 81  |
| รายการสัญลักษณ์ .....                                                                | 83  |
| รายการอ้างอิง .....                                                                  | 86  |
| ภาคผนวก .....                                                                        | 93  |
| ภาคผนวก ก แบบชุดทดสอบ .....                                                          | 94  |
| ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....                                                           | 112 |
| ภาคผนวก ค อุณหภูมิน้ำ (จุดที่เริ่มเก็บผลการทดลอง) .....                              | 162 |
| ภาคผนวก ง การคำนวณประสิทธิภาพลิ่มตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน .....               | 172 |

ประวัติผู้เขียน ..... 177



## สารบัญตาราง

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....                    | 25   |
| ตารางที่ 4.1 ลักษณะการยึดเกาะทางกายภาพของน้ำบนแผ่นพีวีซี ..... | 58   |



## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                             | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 น้ำในหย็อกที่ซึมออกมาในพื้นที่เปิดโล่ง ทำให้อากาศเย็น.....                                       | 5    |
| รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของการทำงานทำความเย็นแบบระเหย.....                                                   | 6    |
| รูปที่ 2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychometric chart).....                                                     | 10   |
| รูปที่ 2.4 ลักษณะของแผนภูมิไซโครเมตริก.....                                                                 | 11   |
| รูปที่ 2.5 โครงสร้างเส้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....                                                           | 12   |
| รูปที่ 2.6 กระบวนการเพิ่มและลดความร้อนแฝง.....                                                              | 13   |
| รูปที่ 2.7 กระบวนการเพิ่มและลดความร้อนสัมผัส.....                                                           | 13   |
| รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณความร้อนสัมผัสในอากาศ.....                                 | 14   |
| รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการทำความเย็น.....                                               | 14   |
| รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นราบ.....                                                               | 15   |
| รูปที่ 2.11 การพาความร้อน.....                                                                              | 16   |
| รูปที่ 2.12 การแผ่รังสีความร้อน.....                                                                        | 17   |
| รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Evaporative Cooling.....                                   | 19   |
| รูปที่ 2.14 Adiabatic Saturation Process.....                                                               | 20   |
| รูปที่ 2.15 ปริมาตรควบคุมของการทำความเย็นแบบระเหย.....                                                      | 27   |
| รูปที่ 2.16 ค่าความหยาดผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ ).....                                             | 30   |
| รูปที่ 2.17 ค่าความหยาดสูงสุด ( $R_y$ ).....                                                                | 30   |
| รูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยความหยาดพื้นผิวแบบสปีจูด ( $R_z$ ).....                                                | 31   |
| รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของผิวเปียกที่มีรูพรุน (a) Aspen Pad (b) Rigid Media Pad (c) Packages or fill pads..... | 32   |
| รูปที่ 2.20 ลักษณะการยึดเกาะของน้ำบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาด.....                                         | 37   |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.21 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Boris Halasz .....                                                                                                  | 38 |
| รูปที่ 2.22 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขต Evaporative Fluid Cooler ของ Qureshi .....                                                                             | 38 |
| รูปที่ 2.23 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Camargo .....                                                                                                       | 39 |
| รูปที่ 2.24 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Paisarn .....                                                                                                       | 39 |
| รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพลิ้มตัวต่อเรย์โนลด์สและความเร็วของ<br>อากาศจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Camargo .....            | 40 |
| รูปที่ 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอากาศด้านนอกและน้ำด้านนอกต่อความเร็วของอากาศ<br>จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Naphon .....                   | 40 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังงานวิจัย.....                                                                                                                                    | 42 |
| รูปที่ 3.2 แผนการทดลองในโครงการวิจัยในส่วนการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวที่มีความ<br>หยาบ .....                                                                | 43 |
| รูปที่ 3.3 แผนการทดลองในโครงการวิจัยส่วนของการทดลองในส่วนของการทดสอบคุณลักษณะใน<br>การทำความเย็นเมื่อใช้เป็นผิวเปียก และการเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้า ..... | 44 |
| รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบการไหลของน้ำบนผิวซี .....                                                                                                                      | 44 |
| รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบระเหย .....                                                                                                                | 45 |
| รูปที่ 3.6 ส่วนเริ่มต้น (Start Section).....                                                                                                                      | 46 |
| รูปที่ 3.7 ส่วนชุดทดสอบ (Test Section) .....                                                                                                                      | 46 |
| รูปที่ 3.8 ส่วนพัดลม (Fan Section).....                                                                                                                           | 47 |
| รูปที่ 3.9 ส่วนติดตั้งเซ็นเซอร์.....                                                                                                                              | 47 |
| รูปที่ 3.10 ถังบรรจุน้ำ (Water Tank).....                                                                                                                         | 48 |
| รูปที่ 3.11 พัดลม (Fan) .....                                                                                                                                     | 48 |
| รูปที่ 3.12 ปั๊มน้ำ AP3500 .....                                                                                                                                  | 48 |
| รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความเร็วลม testo 405i.....                                                                                                                  | 49 |
| รูปที่ 3.14 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำ .....                                                                                                                    | 49 |
| รูปที่ 3.15 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ DHT22 .....                                                                                                      | 49 |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266.....                                                                                                                                 | 50 |
| รูปที่ 3.17 แท่นตั้งแผ่นทดสอบ .....                                                                                                                                             | 50 |
| รูปที่ 3.18 ป้อนน้ำอัตราการไหล 3.5 ลิตรต่อนาที.....                                                                                                                             | 50 |
| รูปที่ 3.19 แผ่นพีวีซีผิวเรียบ.....                                                                                                                                             | 51 |
| รูปที่ 3.20 แผ่นพีวีซีผิวหยาบและการพันทราย.....                                                                                                                                 | 51 |
| รูปที่ 3.21 ผิว Corrugate .....                                                                                                                                                 | 52 |
| รูปที่ 3.22 วัดความกว้างการไหลของน้ำด้านบนตรงกลางและด้านล่างของแผ่น .....                                                                                                       | 53 |
| รูปที่ 4.1 การไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ.....                                                                                                                      | 60 |
| รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับความกว้างการไหลของน้ำ .....                                                                                           | 61 |
| รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพในตัวของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ .....                                                                     | 62 |
| รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพในตัวของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่ดีที่สุด.....                                                           | 63 |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ.....                                       | 64 |
| รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่ดีที่สุด .....                           | 65 |
| รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของแผ่นพีวีซี.....                                             | 66 |
| รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด ..... | 67 |
| รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อประสิทธิภาพในตัวในช่วงที่ผิวอ้อมตัวด้วยน้ำ .....                                                                    | 68 |
| รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงที่ผิวอ้อมตัวด้วยน้ำ .....                                                          | 68 |

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>พื้นที่ผิวสัมผัสในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำ .....                                                                                         | 69 |
| รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อประสิทธิผลอิมตัวในช่วงที่ผิว<br>อิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s.....                                                                                | 70 |
| รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>ในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s.....                                                                       | 72 |
| รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>พื้นที่ผิวสัมผัสในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s.....                                                       | 74 |
| รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับประสิทธิผลอิมตัว<br>ของผิวเปียกของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า ที่ปริมาตรชุดทดสอบ<br>เท่ากันที่ 0.0104 ลูกบาศก์เมตร..... | 77 |
| รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์<br>การพาความร้อนของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า.....                                                    | 78 |
| รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์<br>การพาความร้อนพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า...                                      | 79 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญกับภาคเกษตรกรรมอย่างมาก โดยเน้นการผลิตในลักษณะรูปแบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) ที่เน้นการใช้เทคโนโลยีและวิศวกรรมเพื่อค้นหาวิธีการทำงานให้เหมาะสมและสร้างผลผลิตทางการเกษตรที่ยั่งยืน ลดต้นทุนที่ไม่จำเป็น เพิ่มกำไรให้มากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วผลผลิตทางการเกษตรซึ่งได้จากการเพาะปลูกพืชหรือการเลี้ยงสัตว์ จะได้ผลผลิตที่ดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์แต่ละชนิด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในการทำเกษตรกรรมและปศุสัตว์ที่มีความอ่อนไหวต่อสภาพอากาศ เช่น ทางภาคเหนือจะเหมาะกับการปลูกพืชเมืองหนาว ทางภาคกลางจะเหมาะกับการปลูกพืชเมืองร้อน ทางภาคใต้เหมาะกับการปลูกพืชที่ต้องใช้ความชื้นสูง ทางภาคอีสานเหมาะกับการปลูกพืชจำพวกที่ต้องใช้ดินทราย ส่วนการเลี้ยงสัตว์ที่ใช้บริโภคเป็นอาหารนั้น นอกจากสายพันธุ์และอาหารที่ใช้เลี้ยง รวมไปถึงการดูแลรักษาโรคที่ดีแล้ว สภาวะของอากาศที่เหมาะสมก็มีผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตที่ดีด้วย เช่น การเลี้ยงไก่ในโรงเรือน ไก่จะเจริญเติบโตดีและมีอัตราการไข่เพิ่มขึ้นเมื่อควบคุมสภาวะอากาศภายในโรงเรือน ให้มีอุณหภูมิต่ำพอสมควร และมีความชื้นที่ไม่สูงมากนัก จากตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะอากาศให้เหมาะสมกับพืชและสัตว์แต่ละชนิดเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มผลผลิต ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมปรับอากาศมาใช้ในการปรับสภาวะของอากาศที่เหมาะสมกับพืชและสัตว์ ทำให้สามารถทำการเพาะปลูก หรือเลี้ยงสัตว์ในสภาพภูมิอากาศที่ไม่เหมาะสมได้

ในการปรับสภาวะของอากาศสำหรับการเกษตรและปศุสัตว์นั้น นิยมใช้ระบบทำความเย็นแบบทำระเหย (Evaporative cooling) เพื่อปรับอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น เนื่องจากระบบไม่ซับซ้อน และใช้พลังงานน้อย [1-7] โดยมีหลักการทำงานง่ายๆ คือ ใช้การถ่ายเทความร้อนและมวล ระหว่างน้ำกับอากาศ เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านน้ำ น้ำจะดึงความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) จากอากาศมาใช้ในการระเหยน้ำ ทำให้เปลี่ยนสถานะจากสถานะของเหลวกลายเป็นไอน้ำ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงและมีความชื้นเพิ่มขึ้น ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบการทำความเย็นแบบระเหย และระบบทำความเย็นแบบอัดไอ คือ ระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงพร้อมกับลดความชื้นของอากาศด้วย ส่วนระบบการทำความเย็นแบบระเหยจะลดอุณหภูมิอากาศได้น้อย

กว่าระบบทำความเย็นแบบอัดไอและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการเกษตรกรรม ที่ต้องการอุณหภูมิไม่ต่ำมากและต้องการความชื้นค่อนข้างสูง ในส่วนของราคาเริ่มต้นและค่าการดำเนินงานของระบบการทำความเย็นแบบระเหยจะมีราคาต่ำกว่าการทำความเย็นแบบอัดไอ ระบบการทำความเย็นแบบระเหยจึงเป็นทางเลือกในการปรับอากาศเพื่อประยุกต์ใช้กับการเกษตรกรรมของประเทศไทย

อุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบทำความเย็นแบบระเหย คือ ผิวน้ำเปียก (Wetted Medium) ปัจจุบันผิวน้ำเปียกที่นิยมใช้คือ ผิวน้ำเปียกจากเส้นใยธรรมชาติ [8, 9] เช่น Aspen Pad และแผ่นตัวกลางของแข็ง (Rigid media pad) [10, 11] ผิวน้ำเปียกทั้งสองชนิดนี้มีประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็นที่แตกต่างกัน เนื่องจากผิวน้ำเปียกทั้ง 2 ชนิดมีราคาแพง จึงไม่เหมาะสมกับงานเกษตรกรรมในประเทศไทยที่ต้องการเพิ่มผลผลิตโดยมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นการพัฒनावัสดุที่ใช้ผลิตผิวน้ำเปียกที่มีราคาถูก มีความทนทานและมีคุณลักษณะการทำความเย็นที่ดีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การวิจัยด้านวัสดุปริมาณแห้งที่กระทำกันอย่างกว้างขวางจะให้ความสนใจกับวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นอื่นๆ ได้แก่ แกลบ เส้นใยขุยมะพร้าว และกระดาษต่างๆ [12-29] นอกจากนี้ยังมีความสนใจศึกษาการผลิตวัสดุปริมาณแห้งจากวัสดุรีไซเคิล [30, 31] เช่น เม็ดพลาสติกรีไซเคิล HDPE โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ ความทนทานและประสิทธิภาพของผิวน้ำเปียก โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุปริมาณแห้งทางการค้า เพื่อระบุว่าวัสดุชนิดใดมีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดในระบบการทำความเย็นแบบระเหย

วัสดุอีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เป็นผิวน้ำเปียกคือพลาสติกแข็ง โดยรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใช้พลาสติกพีวีซี และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่ามีประสิทธิภาพของผิวน้ำเปียกที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ และลูกฟูกเซลลูโลส [30-32] อย่างไรก็ตามพลาสติกพีวีซี และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีข้อด้อยที่เหนือกว่าวัสดุทั้งสองอย่างข้างต้นคือ ความทนทานต่อการผุกร่อนรวมถึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 47 ปี [33] และอายุการใช้งานกว่า 24 ปีที่อุณหภูมิเกิน 60 องศาเซลเซียส [34] และความต้านทานต่อการเกิดจุลินทรีย์บนพื้นผิว เนื่องจากผิวน้ำเปียกค้าเซลลูโลส มีการดูดซับน้ำได้ดีกว่าจึงมีโอกาที่จะเกิดจุลินทรีย์บนพื้นผิวได้มากกว่า [35] นอกจากนี้มันยังสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและดีกว่าอีกด้วย สาเหตุที่ทำให้ผิวน้ำเปียกที่ผลิตจากพลาสติกพีวีซี และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าประสิทธิภาพของผิวน้ำเปียกที่ไม่ดีนัก พื้นผิววัสดุทั้งสองชนิดมีความเรียบและลื่นทำให้น้ำเคลือบทั่วทั้งผิวน้ำของวัสดุได้ยาก และไหลผ่านผิวน้ำสัมผัสของวัสดุไปอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมของน้ำบนพื้นผิวในลักษณะนี้ทำให้ค่าประสิทธิภาพของผิวน้ำเปียกและประสิทธิภาพการพาความร้อนมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังทำให้ระยะเวลาที่น้ำสัมผัสอากาศมีค่าลดลงอย่างมาก การเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำกับพื้นผิวสัมผัสของวัสดุสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหยาบบนพื้นผิววัสดุ การเพิ่มความหยาบทำให้เกิดแรงคาปิลลารี (Capillary force) ระหว่างน้ำกับผิวพลาสติก ด้วยแรงนี้น้ำจะ

สามารถเคลือบไปทั่วหน้าผิวสัมผัสของวัสดุ และเพิ่มเวลาในการไหลของน้ำผ่านพื้นที่ผิวสัมผัส [36] ดังนั้นค่าประสิทธิผลอิมมัตว์และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น [37] และระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับอากาศจะมีมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพอิมมัตว์ของผิวเปียกมีค่ามากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของช่องความหยาบผิวบนวัสดุพลาสติกแบบแผ่นบางที่มีต่อคุณลักษณะการทำความเย็นเมื่อใช้งานเป็นผิวเปียก ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำป้อน ประสิทธิภาพอิมมัตว์และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน วัสดุที่เลือกใช้ในการศึกษาคือ พลาสติกพีวีซีหรือแผ่นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง การศึกษาจะเปรียบเทียบผลที่ได้กับพลาสติกที่ไม่ได้รับการปรับปรุง (Untreated plastics) และผิวเปียกชนิดลูกฟูกกระดากที่ใช้ในเชิงการค้า ข้อมูลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประเมินความเป็นไปได้ของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผิวเปียกได้อย่างเหมาะสม รวมทั้งสามารถออกแบบวัสดุพลาสติกที่มีคุณสมบัติตามต้องการเพื่อให้สามารถผลิตผิวเปียกที่มีประสิทธิภาพสูงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของช่องความหยาบผิวบนวัสดุพลาสติกแบบแผ่นบางที่มีต่อคุณลักษณะการทำความเย็นเมื่อใช้งานเป็นผิวเปียก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของช่องความหยาบผิวบนวัสดุพลาสติกแผ่นบางที่มีต่อค่าประสิทธิผลอิมมัตว์ความสามารถในการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำความเย็น เมื่อไหลผ่านผิวเปียกของผิวเปียกที่ผลิตจากวัสดุพลาสติกแบบแผ่นบางที่มีความหยาบของผิวกับผิวเปียกที่ผลิตเชิงการค้า

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาจะกำหนดให้ตัวแปรควบคุม คือ รูปร่างการจัดเรียงตัวของแผ่นผิวเปียก ปริมาตร, พื้นที่ผิวของชุดทดสอบ และความเร็วอากาศสุษสบาย 0.25 เมตรต่อวินาที

1.3.2 วัสดุผิวเปียกที่ทำการศึกษาได้แก่ แผ่นพลาสติกพีวีซีหรือแผ่นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และผิวเปียกเชิงการค้า

1.3.3 การศึกษาครั้งนี้ไม่พิจารณาผลของการอุดตันเนื่องจากการก่อตะกอน และการเกิดจุลชีพนบนพื้นผิวเปียก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบข้อมูลคุณลักษณะของพื้นผิวเรียบและผิวหยาบ

1.4.2 ทราบค่าประสิทธิภาพอิมัตว, ความสามารถในการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

1.4.3 ทราบกรรมวิธีในการผลิตผิวเปียกจากพลาสติกพีวีซีที่มีประสิทธิภาพในการทำความเย็นแบบระเหยที่ดี



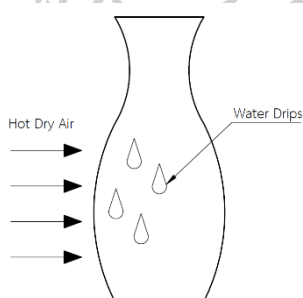
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System)

##### 2.1.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องทำความเย็นแบบระเหย

การทำความเย็นโดยการระเหยของน้ำเป็นวิธีเก่าแก่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิอากาศ ทั้งพืชและมนุษย์ ใช้วิธีนี้เพื่อให้อุณหภูมิลดต่ำลงตามธรรมชาติ พืชจะใช้วิธีนี้ผ่านขบวนการคายน้ำโดยการระเหย ส่วนมนุษย์ใช้การระเหยเหงื่อออกจากผิวหนังในการระบายความร้อน เมื่อน้ำระเหยจะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ การเปลี่ยนสถานะนี้ใช้ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมบริเวณรอบๆ ดังนั้นเมื่อเกิดการระเหยน้ำ พื้นผิวที่น้ำเกาะอยู่จะเย็นขึ้น วิธีการทำความเย็นแบบการระเหยของน้ำมีการใช้ประโยชน์มาอย่างยาวนานหลายยุคสมัย การทำความเย็นแบบระเหยยุคแรกมาจากชาวอียิปต์โบราณ ภาพวาดเมื่อราว 2500 ปีก่อนคริสตกาล แสดงถึงการซึมผ่านของน้ำในเหยือกน้ำโดยการใช้ทาสโบกพัดเพื่อทำให้อากาศเย็นเมื่อไหลผ่านเหยือกน้ำ ดังกล่าวนี้น ในยุคโบราณของอาณาจักรโรมัน และในช่วงระหว่างยุคกลาง ภาชนะที่ใส่น้ำดื่มที่คลุมด้วยผ้าและกระเป๋าส่งน้ำในทะเลทรายจะถูกใช้ในกองทัพทหารและ ลิโอนาร์โด ดา วินชีประดิษฐ์เครื่องทำอากาศให้เย็นทางกลเป็นครั้งแรก เพื่อทำความเย็นในห้องส่วนตัวของภรรยา โดยใช้ขังล่อน้ำเป็นตัวทำความเย็นแบบระเหย



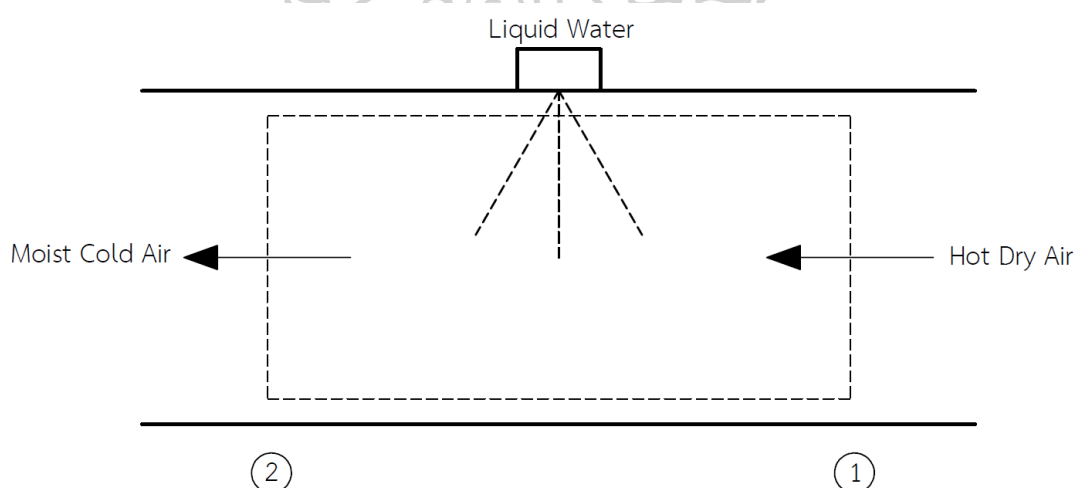
รูปที่ 2.1 น้ำในเหยือกที่ซึมออกมาในพื้นที่เปิดโล่ง ทำให้อากาศเย็น

ส่วนการทำความเย็นแบบระเหยสมัยใหม่นั้น การใช้ Air Washer กับ การทำความเย็นแบบระเหยในโรงงานทอผ้า ถูกประดิษฐ์ขึ้นในประเทศอเมริกาทางตะวันออกระหว่างปี 1900 และ 1930 โดยเครื่องพ่นละอองน้ำชนิด Air Washer ของ Dr. Willis Carrier ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้อากาศชื้นเท่านั้น ยังทำให้อากาศเย็นและสะอาดด้วย การประดิษฐ์นี้นำไปสู่การพัฒนา

Psychometrics สมัยใหม่ของ Dr. Carrier ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบการปรับอากาศทั้งหมดในปัจจุบัน ก่อนปี ค.ศ.1930 มีตัวทำความเย็นระเหยโดยอ้อมสองชนิด ที่แตกต่างกันใน Arizona และ California ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Drip และ Slinger ของตัวทำความเย็นระเหยโดยตรง โดยที่ตัวทำความเย็นระเหยแบบโดยอ้อม ถูกนำไปใช้เป็นอย่างดีในส่วนของ Cooling tower อีกทั้งยังใช้ในการบำบัดก๊าซ และทำความสะอาดเครื่องมือทางอุตสาหกรรม ในประเทศอเมริกาทางตะวันตก ประดิษฐ์ Slinger และ Rotary-Pad Cooler และ Mass-Produced Drip Cooler โดยใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นสำหรับบ้านและอาคาร

### 2.1.2 หลักการทำความเย็นแบบระเหย

ระบบการทำความเย็นแบบระเหย เป็นขบวนการปรับอากาศที่ใช้หลักการลดอุณหภูมิของอากาศโดยอาศัยการระเหยของน้ำ ซึ่งเมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านน้ำ น้ำจะดึงความร้อนสัมผัสจากอากาศมาใช้ในการระเหยจากสถานะของเหลวกลายเป็นไอ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงแต่มีความชื้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของการทำงานของการทำความเย็นแบบระเหย

### 2.1.3 ประเภทของระบบทำความเย็นแบบระเหย แบ่งเป็น 3 ประเภท

1) การทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง (Direct Evaporative Cooling, DEC) เป็นระบบที่ทำให้อากาศที่จ่ายเข้าห้องปรับอากาศ สัมผัสกับน้ำโดยตรงและทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มมากขึ้น ระบบนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็น 2 ระบบ คือ

แบบไม่ใช้ตัวกลาง แบบนี้จะมีการสัมผัสโดยตรง ระหว่างน้ำและอากาศ ข้อดีของระบบนี้ คือ ไม่มีปัญหาเรื่องการต้านทานการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเกี่ยวข้องกับความสามารถในการลดอุณหภูมิอากาศของระบบ วิธีการทั่วไปจะมี

ป้อนน้ำ ป้อนจากถังเก็บขึ้นไป ปล่องให้น้ำไหลลงมาสัมผัสกับอากาศ และน้ำก็จะระเหยตามหลักการของระบบ น้ำส่วนใหญ่ที่ไม่ได้ระเหยก็จะกลับเข้าถังเก็บ

แบบที่ใช้ตัวกลาง (Media) ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ สำหรับตัวกลางที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 แบบ คือ

- Aspen Pad ทำจากเส้นใย Aspen Wood โดยใส่ไว้ในโครงครอบ (Holder) ซึ่งทำจาก Galvanize Steel หรือ พลาสติก โดยมากเส้นใยจะเคลือบสารเพิ่มความเปียก (Wet ability Additives)

- Rigid Medium Pad ทำจากเซลลูโลสหรือ พลาสติก พับเป็นลอน เชื่อมติดกันด้วยกาว สำหรับผิวเปียกแบบนี้ อากาศจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างลอน ทำให้ความดันตกที่ผิวเปียกน้อย มีข้อดีคือไม่ใช้โครงครอบในการติดตั้ง ไม่มีปัญหาการหลุดของเส้นใยเหมือนกับ Aspen Pad และมีอายุการใช้งานยาวนาน

2) การทำความเย็นแบบระเหยโดยอ้อม (Indirect Evaporative Cooling, IEC) เป็นระบบที่พัฒนาจากระบบการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง เพื่อลดความชื้นของอากาศที่เพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น โดยการนำเอาอากาศ หลังจากที่ออกจากกระบวนการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง มาแลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าในระบบนี้อากาศที่จ่ายให้ห้องปรับอากาศ จะไม่สัมผัสโดยตรงกับน้ำทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องความชื้น

3) การทำความเย็นแบบรวมทั้งโดยตรงและโดยอ้อม (Indirect-Direct Evaporative Cooling) เป็นระบบที่นำระบบการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง (IEC) และระบบการทำความเย็นแบบระเหยโดยอ้อม (DEC) มาทำงานร่วมกัน โดยเรียกจำนวนครั้งในการเพิ่มระบบ IEC หรือ DEC เข้ากับระบบว่า Stage เช่น ระบบมี IEC และ DEC อย่างละตัวก็จะเรียกว่า Double Stage ข้อดีของ Stage คือ เป็นการเพิ่มความสามารถในการลดอุณหภูมิทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง

#### 2.1.4 ข้อดีข้อเสียของระบบการทำความเย็นแบบระเหย

ข้อดีของระบบการทำความเย็นแบบระเหย

- ราคาในการติดตั้งและดำเนินการต่ำกว่า สามารถใช้งานได้ง่ายกว่า
- พลังงานที่ใช้ต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบอื่น
- ไม่มีสาร CFC หรือ HFC ในการทำลายโอโซน และจะมีการปล่อยก๊าซ

เรือน กระจกน้อยเนื่องจาก ใช้การระเหยของน้ำในการลดอุณหภูมิของอากาศแทนการใช้สารทำความเย็น และยังช่วยกรองเชื้อโรคและสิ่งสกปรกที่ปนมากับอากาศได้ โดยมีน้ำและผิวเปียกเป็นตัวกรอง

ข้อเสียของระบบทำความเย็นแบบระเหย

- เพิ่มความชื้นในอากาศภายในห้องจนทำให้มนุษย์มีความรู้สึกไม่สบาย ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นระบบปรับอากาศสำหรับมนุษย์

- มีขีดจำกัดในการลดอุณหภูมิ เนื่องจาก ความสามารถในการลดอุณหภูมิ จะขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในอากาศ โดยระบบ Direct Evaporative Cooling และ Single Stage Indirect Evaporative Cooling นั้น จะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศได้ไม่เกินอุณหภูมิ กระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าระบบ และ Multistage Indirect Evaporative Cooling จะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศได้ไม่เกินอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศที่ทางเข้าระบบ

#### 2.1.5 การใช้งานระบบทำความเย็นแบบระเหยในภาคอุตสาหกรรม

1) อุตสาหกรรมสัตว์ปีก: ในโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ปีก ในช่วงเดือนที่ร้อนที่สุดของปีสัตว์ปีกจะค่อนข้างร้อน ด้วยระบบทำความเย็นแบบระเหยทำให้อุณหภูมิและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความเครียดจากความร้อนลดลงได้ และยังปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย

2) อุตสาหกรรมการเกษตร: เป็นส่วนอื่นที่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้ ช่วยรักษาอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ เพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นหน้าที่ของการใช้พลังงานเพื่อเพิ่มการผลิตสูงสุดและลดต้นทุนให้น้อยที่สุด

3) อุตสาหกรรมสุกร: เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ภายในโรงเลี้ยงสุกรการ ด้วยการใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหย เพื่อให้การผลิตมีคุณภาพสูงขึ้นและมีความสะดวกสบายมากขึ้น ทั้งระบบนี้ยังให้อุณหภูมิอากาศและความชื้นคงที่มากขึ้น

4) อุตสาหกรรมนม: เป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีการใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหย ความเครียดจากความร้อนในวัวสามารถทำให้การผลิตน้ำนมลดลง ด้วยระบบทำความเย็นแบบระเหยนี้ จะทำให้สามารถระบายความร้อนได้สูงและลดการสูญเสียผลผลิตในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงมากที่สุดในรอบปี ซึ่งมักจะมาถึงในช่วงฤดูร้อนและต้นฤดูฝน

## 2.2 คุณสมบัติของอากาศชื้น

ในการศึกษากระบวนการลดความชื้นของอากาศ เนื่องจากในบรรยากาศโดยปกติจะไม่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำที่อยู่ในสภาวะไอคง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีความชื้นอยู่ในบรรยากาศ ดังนั้นในประเทศที่อยู่ในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ความชื้นจะเกิดจากน้ำระเหยเข้าร่วมตัวกับอากาศแห้งในปริมาณสูง สมบัติต่างๆของไอน้ำและอากาศแห้งมีต่อไปนี้คือ

### 2.2.1 ความดันไอ (Vapor Pressure)

ความดันไอ  $P_v$  คือ ส่วนของความดันย่อย (Partial Pressure) ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศชื้นนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำ เรียกความดันนี้ว่าความดันไออิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure,  $P_{sat}$ ) ซึ่งค่าความดันไออิ่มตัวนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

### 2.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ ( $\phi$ ) คือ อัตราเศษส่วนเชิงโมล (Mole Fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ ต่อเศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง

### 2.2.3 อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio)

อัตราส่วนความชื้นบางครั้งเรียกว่า ความชื้นจำเพาะ ( $\omega$ ) หมายถึง มวลของน้ำที่ระเหยต่อมวลของอากาศแห้งและโดยปกติจะมีหน่วยเป็น kg water / kg dry air

### 2.2.4 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( $T_{db}$ ) คืออุณหภูมิของอากาศหรือ อากาศชื้นที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งในการวัดจะต้องให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก เพื่อให้ค่าที่ได้ถูกต้อง

### 2.2.5 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก ( $T_{wb}$ ) หมายถึง อุณหภูมิของอากาศชื้นที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่หุ้มด้วยผ้าชื้น โดยมีลมเป่าด้วยความเร็วใกล้เคียง 5 m/s ซึ่งเรียกอุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้ว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริก (Psychrometric Wet-Bulb Temperature) อุณหภูมิกระเปาะเปียก หรืออีกชื่อหนึ่ง เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Wet-Bulb Temperature,  $T_{wb}^*$ ) อุณหภูมินี้ ได้จากการทำให้อากาศชื้นเป็นอากาศชื้นอิ่มตัวแบบอะเดียเบติก (Adiabatic Saturation) โดยการสัมผัสกับน้ำที่อุณหภูมิ  $T_{wb}^*$  จนอากาศนั้นอิ่มตัวเต็มที่ ที่จุดนี้อากาศที่อิ่มตัว จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์

### 2.2.6 อุณหภูมิน้ำค้าง (Dew-Point Temperature)

อุณหภูมิน้ำค้าง ( $T_{dp}$ ) คือ อุณหภูมิที่ ไอน้ำในอากาศ เริ่มควบแน่น เมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้นและความดันบรรยากาศคงที่

### 2.2.7 เอนทัลปีของอากาศชื้น (Moisture Air Enthalpy)

เอนทัลปีของอากาศชื้น ( $h$ ) เป็นผลรวมของเอนทัลปีของอากาศแห้ง ( $h_a$ ) และเอนทัลปีของไอน้ำในอากาศ ( $h_w$ )

$$h = h_a + \omega h_w \quad (2.1)$$

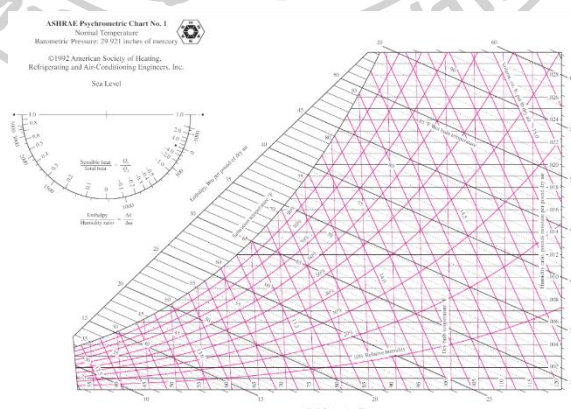
หรือประมาณได้จากสมการดังนี้

$$h = 1.003T + (2501 + 1.775T)\omega \quad (2.2)$$

### 2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)

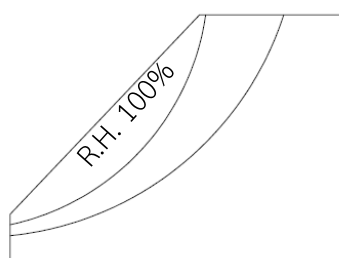
ความชื้นในอากาศอยู่ในรูปของไอน้ำ อากาศสามารถจะอุ้มความชื้นได้ปริมาณมากเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง และความสามารถในการอุ้มความชื้นของอากาศจะลดลงเมื่ออากาศมีอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติเกี่ยวกับความชื้นในอากาศสามารถหาได้จากแผนภูมิไซโครเมตริกซึ่งองค์ประกอบของแผนภูมิตามรูปที่ 2.4 เป็นดังนี้

- เส้นหมายเลข 1 แสดง อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb temperature line: DB)
- เส้นหมายเลข 2 แสดง อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, HR)
- เส้นหมายเลข 3 แสดง สเกลอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio Scale)
- เส้นหมายเลข 4 แสดง อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb temperature line: WB)
- เส้นหมายเลข 5 แสดง ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume, V) หมายถึงปริมาตรของอากาศผสมความชื้น ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง หน่วย คิวบิกฟุตต่อปอนด์อากาศแห้ง
- เส้นหมายเลข 6 แสดง สเกลค่าเอนทัลปี (Enthalpy scale, h)
- เส้นหมายเลข 7 แสดง อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature scale)
- เส้นหมายเลข 8 แสดง ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity line, RH)
- เส้นหมายเลข 9 แสดง สเกลค่าความดันไอ (Vapor Pressure scale, Pw)
- เส้นหมายเลข 10 อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะต่อปริมาณความร้อนทั้งหมด

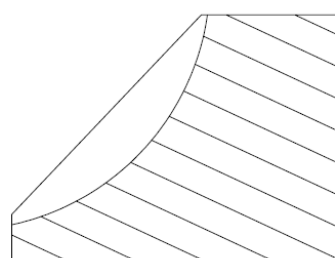


### รูปที่ 2.4 ลักษณะของแผนภูมิไซโครเมตริก

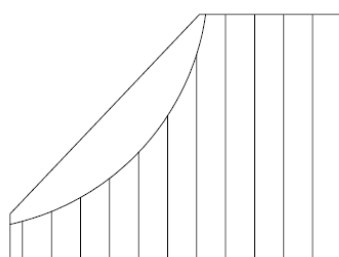
ในแผนภูมิไซโครเมตริก สิ่งเหล่านี้สามารถบอกสถานะของอากาศหลายอย่าง โดยอาศัยความสัมพันธ์กันของคุณสมบัติต่างๆ เช่น ถ้าทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์จะหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้ หรือ ถ้าทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียกและความชื้นสัมพัทธ์จะหาค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งได้ หรือถ้าทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งจะหาค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้ เป็นต้น



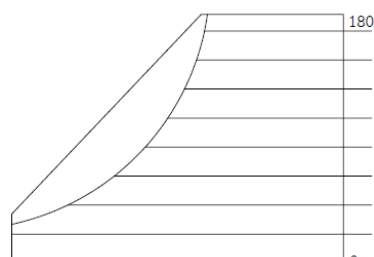
ก. เส้นแสดงความชื้นสัมพัทธ์



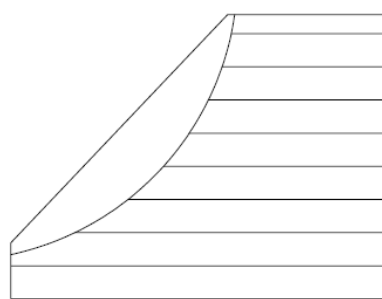
ข. เส้นแสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก



ค. เส้นแสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



ง. เส้นแสดงค่าเกรนของความชื้น



จ. เส้นแสดงค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

## รูปที่ 2.5 โครงสร้างเส้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก

### 2.3.1 รูปแบบทางไซโครเมตริกสำหรับกระบวนการทำความร้อนและความเย็น

ในกระบวนการปรับอากาศ อากาศจะถูกทำให้ร้อนหรือเย็น และไอน้ำในอากาศจะถูกเพิ่มขึ้นหรือถ่ายเทออก เพื่อให้เข้าใจในแต่ละกระบวนการไซโครเมตริก จำเป็นต้องทราบแบบของการเปลี่ยนแปลงในการทำความร้อนและทำความเย็นที่สามารถจะแปลจากแผนภูมิไซโครเมตริก ซึ่งได้แก่ปริมาณความร้อนแฝงในการทำความร้อนและความเย็น และความร้อนสัมผัสในการทำความร้อนและความเย็น

1) ความร้อนแฝง (Latent heat) ความร้อนแฝงแบ่งออกได้เป็นสองอย่างคือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความร้อนแฝงของการหลอมละลาย

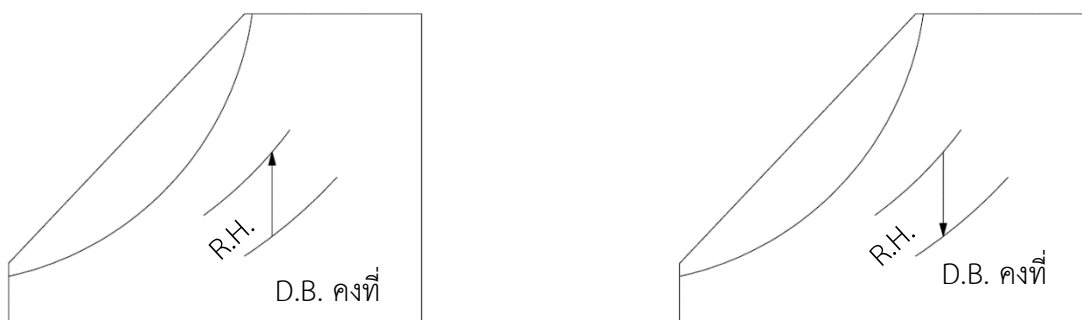
- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เป็นความร้อนที่ต้องการให้การเปลี่ยนของเหลวกลายเป็นไอ หรือความร้อนที่ต้องการเปลี่ยนน้ำจาก 100 องศาเซลเซียส ให้เป็นไอที่ 100 องศาเซลเซียส

- ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย คือ ความร้อนที่ต้องถ่ายออกในการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นของแข็งตัวอย่างเช่น ทำให้เย็นถึงจุดเยือกแข็ง 0 องศาเซลเซียส ถ้าถ่ายเทความร้อนออกอีกน้ำจะกลายเป็นน้ำแข็ง

2) ความร้อนแฝงประยุกต์ใช้กับอากาศ เมื่อหลักของความร้อนแฝงประยุกต์ใช้กับอากาศการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับจำนวนไอน้ำในอากาศ เมื่อเพิ่มความร้อนแฝง จำนวนไอน้ำในอากาศจะเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิของอากาศไม่เปลี่ยน

จากรูปที่ 2.6(ก) สภาพที่เกิดการระเหยแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเพิ่มความร้อนแฝงให้กับอากาศ ผลที่ได้แสดงบนแผนภูมิไซโครเมตริกเป็นเส้นตรงของเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แสดงว่าความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อถ่ายเทความร้อนแฝงออก จำนวนไอน้ำในอากาศลดลง แต่อุณหภูมิของอากาศจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 2.6(ข) สภาพที่เกิดการกลั่นตัว แต่ไม่เปลี่ยนอุณหภูมิอากาศถ่ายเทความร้อนแฝง ผลที่ได้นี้แสดงบนแผนภูมิไชโครเมตริกเป็นเส้นตรงบนเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แสดงการลดของความชื้นสัมพัทธ์



ก. เพิ่มความร้อนแฝง

ข. ลดความร้อนแฝง

รูปที่ 2.6 กระบวนการเพิ่มและลดความร้อนแฝง

### 2.3.2 ความร้อนสัมผัสกับการทำความร้อนและความเย็น (sensible heating and cooling)

ความร้อนสัมผัสเป็นความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่จำนวนไอน้ำในอากาศไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงสามารถรับรู้ได้จากการสัมผัส โดยความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเป็นความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนที่ถ่ายเทออกทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงก็เรียกว่าเป็น ความร้อนสัมผัส (Sensible cooling)

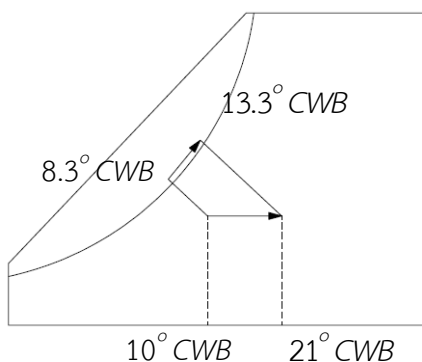
1) ความร้อนสัมผัสประยุกต์ใช้กับอากาศ เมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนสัมผัส อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนไอน้ำในอากาศ ดังรูปที่ 2.7(ก) และเมื่อลดปริมาณความร้อนสัมผัสออกจากอากาศ อุณหภูมิของอากาศจะลดลงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนไอน้ำในอากาศ ดังรูปที่ 2.7(ข)



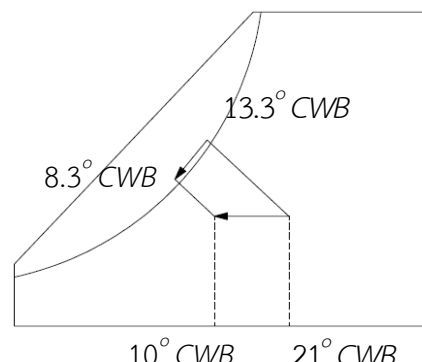
ก. เพิ่มความร้อนสัมผัส

ข. ลดความร้อนสัมผัส

รูปที่ 2.7 กระบวนการเพิ่มและลดความร้อนสัมผัส

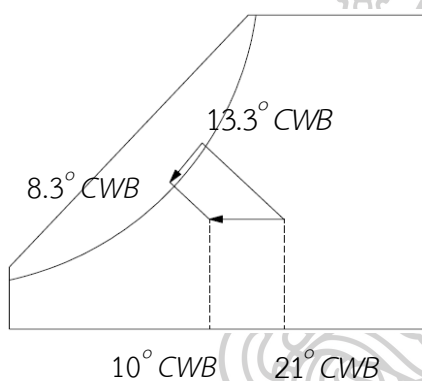


ก. อุณหภูมิกระเปาะเปียกสูงขึ้น

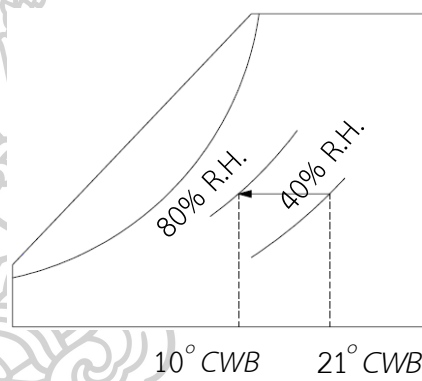


ข. อุณหภูมิกระเปาะเปียกลดลง

รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณความร้อนสัมผัสในอากาศ



ก. อุณหภูมิกระเปาะเปียกลดลง



ข. ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น

รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการทำความเย็น

จากรูปที่ 2.9 เมื่อมีการทำความเย็น อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลงจาก 21 เป็น 10 องศาเซลเซียส และจุดน้ำค้างคงที่ ที่ 7.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะลดลงจาก 13.3 เป็น 8.3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 40 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนคือการถ่ายโอนความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยสามารถจะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

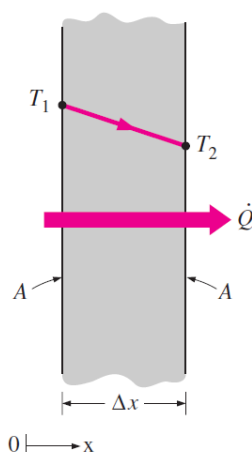
2.4.1 การนำความร้อน (Conduction) เป็นวิธีการเคลื่อนที่ของความร้อน ซึ่งความร้อนจะส่งผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในเนื้อวัตถุเดียวกันหรือต่างกัน ความร้อนจะไหลผ่านของแข็งโดยวิธีนี้

ตัวอย่างเช่นถ้าจับปลายข้างหนึ่งของแท่งโลหะไว้ แล้วนำปลายอีกข้างหนึ่งของโลหะนั้นเผาไฟ ในไม่ช้าจะรู้สึกว่ามีความร้อนมาถึงมือที่จับโลหะ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะโมเลกุลของโลหะตรงจุดที่ถูกไฟเผาได้รับปริมาณความร้อนมากและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งงานไปให้โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงจากโมเลกุลแรกไปยังโมเลกุลที่สองและต่อ ๆ ไปจนถึงปลายอีกข้างหนึ่งของโลหะที่มือจับอยู่ ซึ่งเรียกว่าเกิดการนำความร้อนในแท่งโลหะนั้นโดยที่โมเลกุลของแท่งโลหะไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย

การนำความร้อนเกิดขึ้นในของแข็งได้ดีกว่าของเหลวและแก๊ส โลหะที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุดคือ เงิน รองมาคือ ทองแดง ทองคำ และทองเหลือง ตามลำดับ จากความรู้ในเรื่องของการนำความร้อนนี้ สามารถนำมาเลือกชนิดของโลหะที่ทำท่อทางเดินน้ำยาของระบบเครื่องทำความเย็น ซึ่งจะใช้ ทองแดง ทั้งนี้เพราะทองแดง เป็นตัวนำความร้อนที่ดีเกือบเท่าเงิน แต่ราคาถูกกว่ากันมาก

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักๆคือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ( $k$ ), พื้นที่รับความร้อน ( $A$ ), ความหนาของ แผ่นเรียบ ( $L$ ) เพราะฉะนั้นจะได้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนผ่านแผ่นเรียบเป็น ดังสมการ (2.3)

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นราบ

“ที่มา: Heat and Mass Transfer Fundamentals & Application by Yunus A. Cengel”

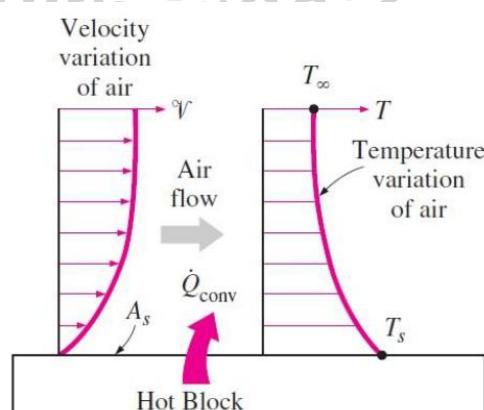
|                                |                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ $\dot{Q}_{\text{cond}}$ | คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของการนำความร้อน (W)                          |
| K                              | คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity, W/mk)              |
| A                              | คือ พื้นที่รับความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน ( $\text{m}^2$ ) |
| $T_1$                          | คือ อุณหภูมิของด้านที่ได้รับความร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ หรือ K)       |
| $T_2$                          | คือ อุณหภูมิที่อีกด้านของแผ่นเรียบ ( $^{\circ}\text{C}$ หรือ K)         |
| L                              | คือ ความหนาของแผ่นเรียบ (m)                                             |

2.4.2 การพาความร้อน (convection) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหล ซึ่งโมเลกุลมีอิสระที่จะเคลื่อนไหวไปรอบๆได้ เมื่อความร้อนเคลื่อนที่โดยวิธีนี้ จำนวนของปริมาณความร้อนจะไหลโดยติดไปกับโมเลกุลซึ่งกำลังเคลื่อนที่อยู่

การพาความร้อนจะเกิดขึ้นในของเหลวหรือแก๊ส ซึ่งเป็นของไหลเท่านั้น แต่จะไม่เกิดขึ้นในของแข็งทั้งนี้เพราะโมเลกุลของของแข็งอยู่กับที่ การพาความร้อนเกิดขึ้นโดยหลักที่ว่า เมื่อโมเลกุลของของเหลวหรือแก๊สได้รับความร้อนจะขยายตัวและมีความหนาแน่นน้อยลง จึงเบาและลอยตัวสูงขึ้น พาเอาความร้อนเคลื่อนที่ติดไปด้วย ของเหลวหรือแก๊สบริเวณใกล้เคียง ซึ่งเย็นกว่าและมีความหนาแน่นมากกว่า จะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดการไหลวนขึ้นในของเหลวหรือแก๊ส ทำให้ความร้อนไหลวนเวียนตามโมเลกุลไปด้วย

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนนั้นจะดีหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักๆ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) (h), พื้นที่ที่ได้รับความร้อน ( $A_s$ ) เพราะฉะนั้นจะได้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเป็น ดังสมการ (2.4)

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_c A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.11 การพาความร้อน

“ที่มา: Heat and Mass Transfer Fundamentals & Application by Yunus A. Cengel”

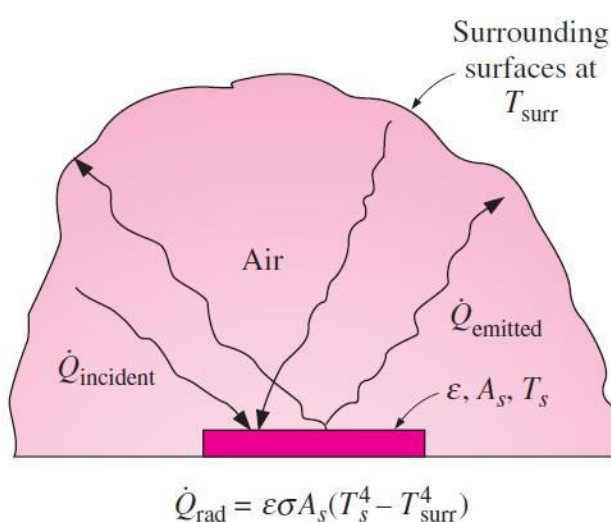
- โดยที่  $\dot{Q}_{\text{conv}}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อน (W)  
 $h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
 (Convective heat transfer coefficient,  $\text{W/m}^2\text{K}$ )  
 $A_s$  คือ พื้นที่ผิว (Area Surface,  $\text{m}^2$ )  
 $T_s$  คือ อุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature,  $^{\circ}\text{C}$  หรือ  $\text{K}$ )  
 $T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient Temperature,  $^{\circ}\text{C}$  หรือ  $\text{K}$ )

2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation) เป็นวิธีการ เคลื่อนที่ของความร้อนโดยไม่ได้อาศัยกับ อยู่โมเลกุล วิธีนี้ความร้อนจะเคลื่อนที่ทางเดียวกับแสงเดินทางจากดวงไฟ ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับที่ความ ร้อนจากดวงอาทิตย์ส่งผ่านมายังโลก

การแผ่รังสีความร้อนจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ แต่ การแผ่รังสีจะเกิดขึ้นในรูปของคลื่นเช่นเดียวกับคลื่นแสง ตัวอย่างที่สามารถอธิบายให้เห็นได้ง่าย ๆ คือหลอดไฟฟ้า ซึ่งภายในเป็นสุญญากาศ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด จะเกิดความร้อน และแสงสว่างที่ไส้หลอดนั้น ถ้าเอามือจับที่ผิวหลอดไฟจะรู้สึกร้อน ที่เป็นเช่นนี้เพราะความร้อนจากไส้ หลอด ส่งผ่านสุญญากาศในหลอดมายังผิวหลอดได้ในรูปของคลื่นเช่นเดียวกับคลื่นแสงนั่นเอง ซึ่งการ ถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจะดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับตัวแปร หลักๆ คือ ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) เพียงตัวแปรเดียวเท่านั้น โดยจะคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.12 การแผ่รังสีความร้อน

“ที่มา: Heat and Mass Transfer Fundamentals & Application by Yunus A.”

|                               |                                                                                                   |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ $\dot{Q}_{\text{rad}}$ | คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน (W)                                              |
| $\epsilon$                    | คือ ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)                                                                   |
| $\sigma$                      | คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$ (W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> ) |
| $A_s$                         | คือ พื้นที่ผิว (Area Surface, m <sup>2</sup> )                                                    |
| $T_s$                         | คือ อุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature, °C หรือ K)                                              |
| $T_{\text{surr}}$             | คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient Temperature, °C หรือ K)                                          |

#### 2.4.4 ทิศทางและอัตราการไหลของความร้อน

ในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ ความร้อนจะไหลจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับ

1) ความแตกต่างของอุณหภูมิ มีผลต่อความเร็วในการไหลของความร้อน คือ ถ้าวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก จำนวนของแคลอรีจะไหลจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้เร็ว แต่ถ้าอุณหภูมิแตกต่างกันน้อย จำนวนของแคลอรีจะไหลช้า และถ้าอุณหภูมิไม่แตกต่างกันเลยก็就不用มีการไหลของความร้อนเกิดขึ้น

2) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุที่ร้อนกับวัตถุอื่น โดยทั่วไป ถ้าพื้นที่ผิวถูกสัมผัสมาก อัตราการไหลของความร้อนจะมีมาก เช่น แก้วน้ำสองใบที่มีปริมาตรและอุณหภูมิที่เท่ากัน ถ้าใส่น้ำแข็งลงในแก้วทั้งสองให้มีปริมาณเท่า ๆ กันแต่แก้วแรกใส่ทั้งก้อน แก้วที่สองทุบให้เป็นเกล็ด สังเกตดูจะเห็นว่าน้ำในแก้วที่สองจะเย็นเร็วกว่าน้ำในแก้วแรก เพราะน้ำแข็งเกล็ดมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าน้ำแข็งก้อน

#### 2.5 กระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น

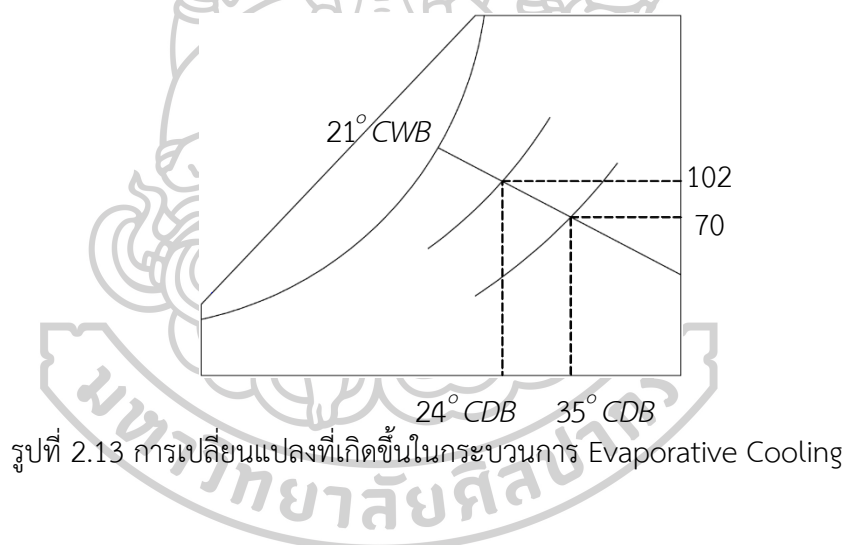
เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อมีการทำความสะอาดอากาศด้วยสเปรย์ของน้ำ ซึ่งในขณะเดียวกัน อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วย เมื่อพิจารณาแผนภูมิไซโครเมตริกจะเห็นว่าจากรูปที่ 2.9 สภาพของอากาศขณะผ่านอุปกรณ์ทำความสะอาดอากาศจะเป็นเส้นตรง ที่ทับกับแนวของเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ตามทฤษฎี ภายหลังจากผ่านอุปกรณ์ ทำความสะอาดอากาศแล้ว อุณหภูมิของน้ำ ควรจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก แต่ทางปฏิบัติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการพิจารณาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทำความสะอาดอากาศ จึงจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งนี้ลดลงจริงหารด้วยอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สามารถลดลงได้มากที่สุดตามทฤษฎี

## 2.6 การทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative cooling)

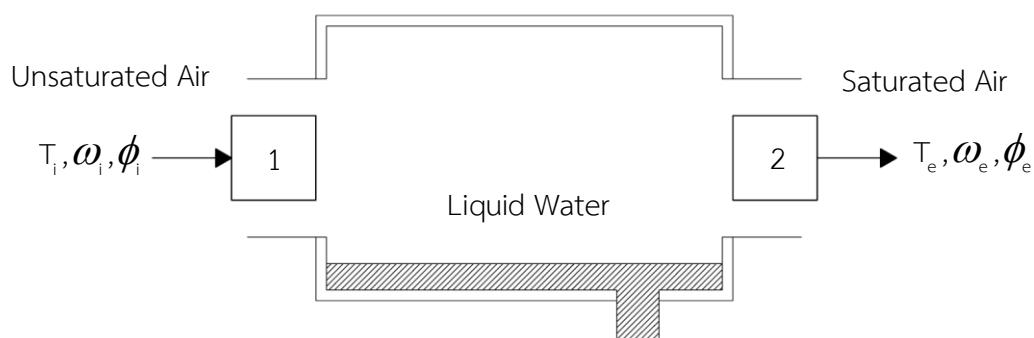
การทำความเย็นแบบระเหยเป็นกระบวนการซึ่งความร้อนสัมผัสได้ถูกถ่ายเทออก และ ความชื้นได้เพิ่มเข้าไปในอากาศ กระบวนการสามารถจะพลอตลงบนแผนภูมิไซโครเมตริก เป็นเส้นทแยงสูงขึ้นทางซ้าย

การทำความเย็นแบบระเหยต้องการคอยล์สเปรย์ เมื่ออากาศผ่านไปทีสเปรย์น้ำจะให้ความร้อนกับน้ำที่เย็นกว่า น้ำจำนวนหนึ่งจะระเหยเมื่อรับความร้อนจากอากาศ ใอน้ำที่ระเหยจะถูกนำไปตามกระแสของอากาศทำให้อากาศเย็นลงและความชื้นสูงขึ้น

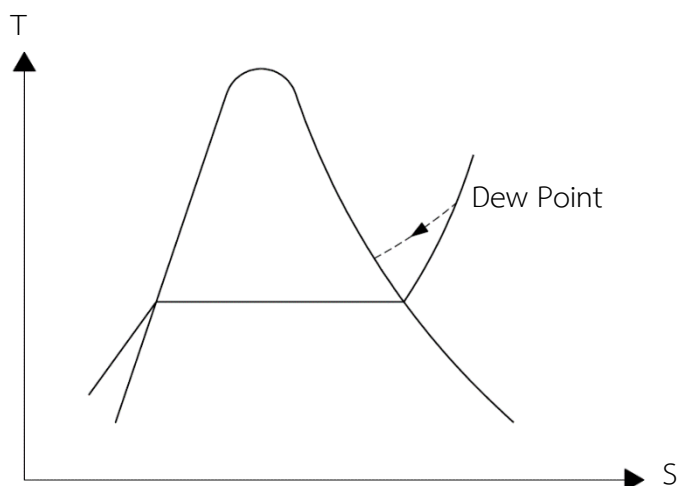
ตัวอย่างเช่น อากาศที่ส่งเข้าในสเปรย์น้ำที่ 35 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิกระเปาะแห้ง) และถูกทำให้เย็นลงถึง 24 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิกระเปาะแห้ง) จากรูปที่ 9 จำนวนไอน้ำในอากาศเพิ่มจากประมาณ 70 เป็น 102 แกรน/ปอนด์ ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจากประมาณ 29 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ที่ 21 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่ของกระบวนการอีวาพอเรตีฟคูลิ่งตามเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก



## 2.7 หลักการของกระบวนการอะเดียเบติก (Adiabatic Saturation Process)



ก) Adiabatic saturation temperature



ข) แสดงในรูป T-S ไดอะแกรม

รูปที่ 2.14 Adiabatic Saturation Process

จากรูปที่ 2.14(ก) แสดงระบบอะเดียเบติกซึ่งประกอบด้วยช่องความยาวที่หุ้มฉนวนที่บรรจุ น้ำอยู่ภายใน เมื่ออากาศที่ไม่อิ่มตัวที่สภาวะคงตัว (Steady) มีสัดส่วนความชื้น (Humidity Ratio)  $\omega_i$ , ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)  $\phi_i$ , อุณหภูมิ  $T_i$  และเอนทัลปี  $h_i$  เคลื่อนที่ผ่านช่องนี้ที่ ตำแหน่งที่ 1 ขณะที่อากาศไหลผ่านน้ำ น้ำจะดึงความร้อนจากอากาศมาใช้ในการระเหยจากของเหลว เป็นไอ ทำให้อากาศที่ทางออกมีปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิลดต่ำลงเป็น  $T_e$  โดย ( $T_e < T_i$ ) และมีสัดส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น  $\omega_e$  ซึ่ง ( $\omega_e > \omega_i$ ) และถ้ากระแสอากาศที่ทางออกเป็นอากาศ อิ่มตัว ( $\phi = 100\%$ ) ที่อุณหภูมิ  $T_e$  ซึ่งจะเรียกว่าเป็น Adiabatic Saturation Temperature จะเห็น ได้ว่าอากาศถูกดึงความร้อนสัมผัสมาใช้ในการ เปลี่ยนสถานะของน้ำแต่ก็มีความร้อนแฝงของการ ระเหยถ่ายเทกลับไปให้อากาศ ดังนั้น กระบวนการอะเดียเบติกจึงถือได้ว่าเป็นกระบวนการเอนทัลปี คงที่ ( $h_i = h_e$ ) สำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย ถึงแม้จะทำงานตามกระบวนการ แต่ก็มีข้อ แตกต่างกันตรงที่ระบบทำความเย็นแบบระเหยจะไม่สามารถทำให้อากาศที่ทางออกถึงจุดอิ่มตัวได้ จึง เป็นกระบวนการที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อน ในระบบทำความเย็นแบบระเหยจะทำให้ สมบูรณ์ จะต้องจ่ายน้ำในปริมาณที่มากพอที่จะระเหย ทำให้อากาศอิ่มตัวไปด้วยน้ำ แต่ในระบบทำ ความเย็นแบบระเหย จะถูกจำกัดโดยคุณสมบัติของผิวเปียกหรือตัวกลางที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่สัมผัส ระหว่างน้ำกับอากาศ [2]

กระบวนการอะเดียเบติก จะพิจารณาเป็นกระบวนการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) ซึ่งไม่ มีความร้อนหรืองานเข้ามาเกี่ยวข้อง พลังงานจลน์และพลังงานศักย์จะไม่นำมาคิดในสมดุลพลังงานนี้

สมการพลังงานสำหรับส่วนผสมของไอน้ำระหว่างอากาศกับน้ำ สามารถแยกพิจารณาได้ 2 ส่วน

1) กฎอนุรักษ์มวลสารในลักษณะการไหลคงตัว

$$\dot{m}_{a,i} = \dot{m}_{a,e} = \dot{m}_a \quad (2.6)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งคงที่

$$\dot{m}_a \omega_i + \dot{m}_e = \dot{m}_a \omega_e \quad (2.7)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำในอากาศจะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เท่ากับอัตราของการระเหยของน้ำ  $\dot{m}_e$

2) กฎอนุรักษ์พลังงานในลักษณะการไหลคงตัว

$$q - \dot{W} = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.8)$$

โดยที่  $q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ/s หรือ kW)

$\dot{W}$  คือ งาน (kJ)

$\Delta H$  คือ ผลต่างของเอนทาลปี (kJ)

$\Delta KE$  คือ ผลต่างของพลังงานจลน์ (kJ)

$\Delta PE$  คือ ผลต่างของพลังงานจลน์ (kJ)

ในกรณีที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ ( $\Delta KE$ ) พลังงานจลน์ ( $\Delta KE$ ) และงาน ( $\dot{W}$ ) เกิดขึ้น ดังนั้น  $\Delta PE$ ,  $\Delta KE$  และ  $\dot{W}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$q = \Delta H \quad (2.9)$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e + q$$

$$\dot{m}_{a,i} h_i + \dot{m}_e h_w = \dot{m}_{a,e} h_e + q \quad (2.10)$$

แทนค่า  $\dot{m}_e$  ในสมการ (2.10) โดย  $\dot{m}_e = \dot{m}_a (\omega_e - \omega_i)$  จะได้

$$\dot{m}_{a,i} h_i + \dot{m}_a (\omega_e - \omega_i) h_w = \dot{m}_{a,e} h_e + q \quad (2.11)$$

หาร  $\dot{m}_a$  ตลอดทั้งสมการ (2.11) จะได้

$$h_i + (\omega_e - \omega_i) h_w = h_e + \frac{q}{\dot{m}_a} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.1) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$(h_{a,i} + \omega_i h_{g,i}) + (\omega_e - \omega_i) h_w = (h_{a,e} + \omega_e h_{g,e}) + \frac{q}{\dot{m}_a} \quad (2.13)$$

หากพิจารณาเป็น Ideal Gas สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{q}{\dot{m}_a} = c_{p,a} (T_{db,1} - T_{db,2}) + \omega_i (h_{g,1} - h_{g,wb}) - \omega_e (h_{g,2} - h_{g,wb}) \quad (2.14)$$

โดยที่  $\omega_i$  คือ ความชื้นจำเพาะของอากาศที่ทางเข้า

- $\omega$  คือ ความชื้นจำเพาะของอากาศที่ทางออก  
 $h_e$  คือ ค่าเอนทัลปีที่ทางออก (kJ/kg)  
 $h_i$  คือ ค่าเอนทัลปีที่ทางเข้า (kJ/kg)  
 $T_{db,1}$  คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศทางเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{db,2}$  คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศทางออก ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\dot{m}_a$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg)  
 $\dot{m}_e$  คือ อัตราการไหลของการระเหยน้ำ (kg)  
 $h_{g,1}, h_{g,2}$  คือ เอลล์ปีของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิทางเข้าและทางออก (kJ/kg dry air)  
 $h_{g,wb}$  คือ เอลล์ปีของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้า (kJ/kg dry air)  
 โดยที่  $\dot{m}_a$  มีค่าเท่ากับ

$$\dot{m}_a = \rho VA \quad (2.15)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศที่ทางเข้า ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ ( $\text{m}^2$ )

ความชื้นจำเพาะของอากาศหาได้จาก

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_a V / (R_a T)} = \frac{P_v R_v}{P_a R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg water/kg dry air}) \quad (2.16)$$

โดยที่  $m_v$  คือ มวลไอน้ำในอากาศ (kg)

$m_{sat}$  คือ มวลน้ำในอากาศที่อิ่มตัว (kg)

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_g T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $P_g = P_{sat@T}$  คือ ความดันน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $T$

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพันธ์กับความชื้นจำเพาะได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g}$$

และ

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (2.18)$$

|        |        |                                |
|--------|--------|--------------------------------|
| โดยที่ | $m_v$  | คือ มวลของไอน้ำ (kg)           |
|        | $m_a$  | คือ มวลของอากาศ (kg)           |
|        | $\phi$ | คือ ความชื้นสัมพัทธ์           |
|        | $P_v$  | คือ ความดันของไอน้ำ (kPa)      |
|        | $P_a$  | คือ ความดันของอากาศ (kPa)      |
|        | $R_v$  | คือ ค่าคงที่ของไอน้ำ (kJ/kg-K) |
|        | $R_a$  | คือ ค่าคงที่ของอากาศ (kJ/kg-K) |

## 2.8 ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหย

โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหย จะใช้ประสิทธิภาพอิ่มตัว (Saturating Efficiency) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง อุณหภูมิที่ลดได้จริงกับอุณหภูมิที่สามารถลดได้ตามทฤษฎี ซึ่งได้แก่ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศทางเข้า และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า สามารถเขียนในรูปของสมการดังนี้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = \left( \frac{T_{\text{db},i} - T_{\text{db},e}}{T_{\text{db},i} - T_{\text{wb}}} \right) \quad (2.19)$$

|        |                            |                                                                                        |
|--------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $\mathcal{E}_{\text{sat}}$ | คือ ประสิทธิภาพอิ่มตัว (Saturated Efficiency)                                          |
|        | $T_{\text{db},i}$          | คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )                               |
|        | $T_{\text{db},e}$          | คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางออก ( $^{\circ}\text{C}$ )                                |
|        | $T_{\text{wb}}$            | คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ทางเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ ) หาได้จาก Psychrometric chart |

เขียนในรูปสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะได้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = 1 - \exp \left( - \frac{h_c A_s}{\dot{m}_a c_{p,u}} \right) \quad (2.20)$$

|        |             |                                                          |
|--------|-------------|----------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $h_c$       | คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) |
|        | $A_s$       | คือ พื้นที่ผิวสัมผัส ( $\text{m}^2$ )                    |
|        | $\dot{m}_a$ | คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)                    |
|        | $c_{p,u}$   | คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg-K)                       |

## 2.9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการไม่ว่าจะเป็นความเร็วของของไหล คุณสมบัติของของไหลเป็นต้น ซึ่งในการกำหนดสมการจะให้ตัวแปรที่อยู่ในสมการมีค่อนข้างน้อยการกำหนดในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติก็คือ การนำสมการดังกล่าวไปใช้จะมีความสะดวกมากยิ่งขึ้นในกรณีที่ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมีลักษณะคล้ายกันแต่มีขนาดต่างกัน การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลโดยทั่วไปทำได้ 2 วิธีคือ

2.9.1 วิธีทางทฤษฎี ซึ่งจะใช้การวัดค่าต่างๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวและนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ สำหรับกลุ่มตัวแปรไร้มิติจะอยู่ในรูปนัตเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt Number, Nu) สำหรับการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number, Re) และพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl Number, Pr) โดยมากจะอยู่ในรูปของสมการเอมพirical ได้ดังนี้

$$Nu = a Re^n Pr^m \quad (2.21)$$

โดยที่  $Re < 2300$  เป็นการไหลแบบราบเรียบ

$2300 < Re < 10000$  เป็นการไหลในช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อแบบราบเรียบและปั่นป่วน

$Re > 10000$  เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

ในกรณีที่ของไหลไหลแบบปั่นป่วน ค่า  $0.7 < Pr < 160$  และจะได้ว่าค่าคงของ  $a = 0.023$ ,  $n = 0.8$  และ สำหรับอากาศค่า  $m$  จะมีค่าประมาณ 0.4 ในการทำความร้อน และ 0.3 ในการทำความเย็น

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (2.22)$$

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วอากาศ (m/s)

$\nu$  คือ ความหนืดจลนศาสตร์ของอากาศ ( $m^2/s$ )

$D_h$  คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

และ  $D_h$  = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เมื่อหน้าตัดท่อกลม

$D_h$  = ความยาวด้านใดด้านหนึ่งของท่อ เมื่อหน้าตัดท่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$D_h$  =  $2(\text{กว้าง} \times \text{ยาว}) / \text{กว้าง} + \text{ยาว}$  เมื่อหน้าตัดท่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$D_h$  = คือความยาวของแผ่นราบเรียบ เมื่อไหลผ่านแผ่นราบเรียบ

2.9.2 วิธีทดลอง เนื่องจากในบางครั้งสภาพการไหลของของไหลยากต่อการพิจารณาวิธีทฤษฎีไม่สามารถทำได้ หรือมีความยุ่งยากมาก จึงใช้วิธีทดลองซึ่งทำได้โดยการทดสอบหาค่าการถ่ายเทความร้อน และนำผลมาคำนวณ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของผิวเปียกที่ใช้ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงความสามารถในการระบายน้ำของผิวเปียก ซึ่งใช้สมการทำนายความสามารถในการลดอุณหภูมิของระบบหรือใช้ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับหรือการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ และเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจำเป็นต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหลเป็นปัจจัยสำคัญ ในการถ่ายเทความร้อน ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน เช่น การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นราบ กับ การถ่ายเทความร้อนของทรงกระบอกจะมีค่าแตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แบบการพาสามารถหาได้จาก

$$q = h_H A_s \Delta T_{lm} \quad (W) \quad (2.23)$$

พิจารณาเป็นความต้านทานความร้อน

$$q = \frac{\Delta T_{lm}}{Z} \quad (W) \quad (2.24)$$

และ  $Z = \frac{1}{h_H A_s} \quad (2.25)$

โดยที่  $h_H$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) ซึ่งมีค่าดังตาราง 1

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวเปียกที่สัมผัสกับอากาศ ( $m^2$ )

$\Delta T_{lm}$  คือ log mean temperature difference ( $^\circ C$ )

$Z$  คือ ความต้านทานความร้อน ( $^\circ C/W$ )

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

| Type of Convection           | $h \text{ (} W/m^2 \text{ } ^\circ C \text{)}$ |
|------------------------------|------------------------------------------------|
| Free convection of gases     | 2-25                                           |
| Free convection of liquids   | 10-1000                                        |
| Forced convection of gases   | 25-250                                         |
| Forced convection of liquids | 50-20000                                       |
| Boiling and condensation     | 2500-100000                                    |

เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกจะมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งโดยมากพบว่าจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน เอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ดังนั้นค่าของผลต่างอุณหภูมิจึงต้องใช้ log mean temperature difference ซึ่งเป็นค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (logarithmic) ระหว่างน้ำและอากาศซึ่งหาได้จากสมการ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{db,i} - T_{wb,i}) - (T_{db,e} - T_{wb,e})}{\ln \left[ \frac{(T_{db,i} - T_{wb,i})}{(T_{db,e} - T_{wb,e})} \right]} = \frac{(T_{db,e} - T_{wb,i})}{\ln \left[ \frac{(T_{db,e} - T_{wb,i})}{(T_{db,i} - T_{wb,i})} \right]} \quad (2.26)$$

โดยที่  $T_{db,i}$  คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{db,e}$  คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{wb,i}$  คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

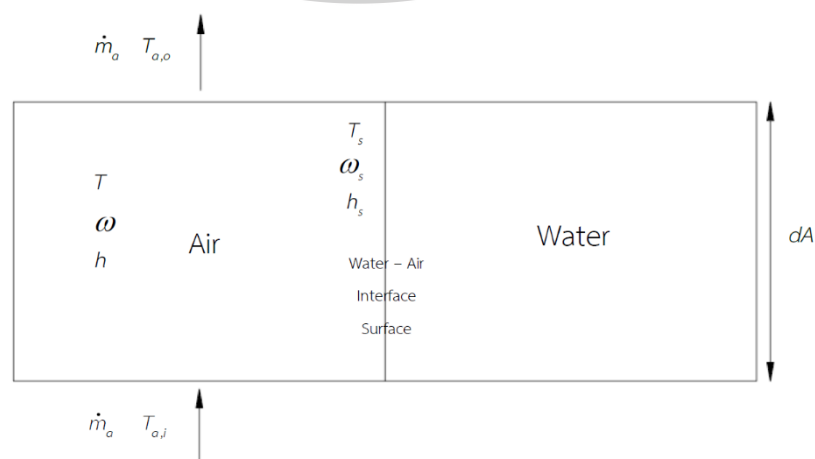
$T_{wb,e}$  คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางออก ( $^{\circ}\text{C}$ )

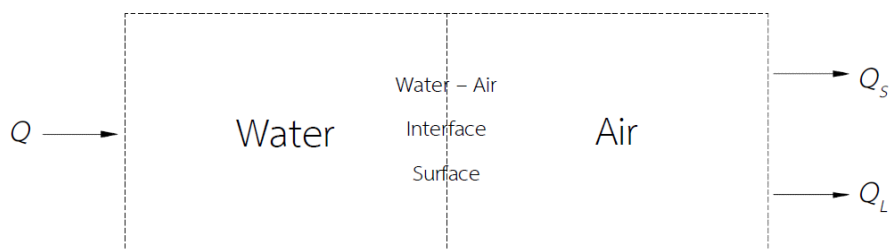
## 2.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบระเหย

รูปที่ 2.15 แสดงปริมาณควบคุมสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหยระหว่างอากาศกับน้ำ โดยพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศกับน้ำคือพื้นที่ของผิวเปียก โดยมีสมมติฐานดังนี้คือ

- ระบบเป็นแบบสภาวะคงตัว
- ระบบเป็นอะเดียแบติก
- น้ำถูกวนกลับมาใช้ในระบบ
- ถือว่าการแผ่รังสีมีค่าน้อยมาก
- ไม่คิดการสูญเสียน้ำ
- ผิวเปียกเปียกอย่างสมบูรณ์
- การกระจายอากาศและน้ำสม่ำเสมอ เป็นรูปแบบ 1 มิติ คือ ขึ้นกับแนวตั้งเท่านั้น
- แผ่นน้ำที่เคลือบผิวเปียกจะถือว่าบางมาก หรือกล่าวคือพื้นที่สัมผัสอากาศกับน้ำจะเท่ากับพื้นที่ผิวเปียก

- อากาศชั้นจะถูกพิจารณาเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ





รูปที่ 2.15 ปริมาตรควบคุมของการทำความเย็นแบบระเหย

จากรูปที่ 2.15 การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิ  $T_s$  และอุณหภูมิ  $T$  และจะเกิดการถ่ายเทมวลขึ้นเช่นเดียวกัน ถ้ามีความต่างของความชื้นจำเพาะ  $\omega_s$  และ  $\omega$  เทอมของความร้อนสัมผัสในหน่วย kW จะเขียนได้ดังนี้

$$Q_s = h_c (T_s - T) dA \quad (2.27)$$

โดยที่  $h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{kW/m}^2\text{K}$ )

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของเหลวกับน้ำ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T$  คือ อุณหภูมิ Dry-Bulk ( $^{\circ}\text{C}$ )

ในขณะเดียวกันอัตราการระเหยของน้ำจะเขียนอยู่ในรูปการถ่ายเทมวลได้คือ

$$d\dot{m}_v = h_m \rho_a (\omega_s - \omega) dA \quad (2.28)$$

โดยที่  $\dot{m}_v$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล ( $\text{kg/s}$ )

$h_m$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $\text{m/s}$ )

$\rho_a$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )

$\omega_s$  คือ ความชื้นจำเพาะที่ผิวสัมผัสอากาศและน้ำ ( $\text{kgH}_2\text{O/kg dry air}$ )

$\omega$  คือ ความชื้นจำเพาะของอากาศ ( $\text{kgH}_2\text{O/kg dry air}$ )

สมดุลพลังงานจากรูปที่ 2.15 ข. จะได้

$$Q = Q_s + Q_L \quad (2.29)$$

$$\text{หรือ} \quad Q_L = Q - Q_s = h_L d\dot{m}_v \quad (2.30)$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (kW)

$h_L$  คือ เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอ ( $\text{kJ/kg}$ )

นำสมการที่ 2.27, 2.28 และ 2.30 แทนในสมการ 2.29 ได้ว่า

$$Q = [h_c (T_s - T) + h_L h_m \rho_a (\omega_s - \omega)] dA \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.31 จะเห็นว่าการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) จะอยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงความชื้น จัดรูปใหม่โดยเขียนในรูปการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีจะได้ว่า

$$h_s - h = (h_{a,s} - h_a) + (\omega_s h_{v,s} - \omega h_v) \quad (2.32)$$

โดยที่  $h_{a,s}$  คือ เอนทาลปีของอากาศที่ผิวสัมผัสอากาศและน้ำ (kJ/kg)

$h_a$  คือ เอนทาลปีของอากาศ (kJ/kg)

$h_{v,s}$  คือ เอนทาลปีของไอน้ำที่ผิวสัมผัสอากาศและน้ำ (kJ/kg)

$h_v$  คือ เอนทาลปีของไอน้ำ (kJ/kg)

สมมติฐานว่าอากาศและไอน้ำเป็นก๊าซในอุดมคติจะได้

$$h_s - h = c_{p,u} (T_s - T) + h_{v,s} (\omega_s - \omega) \quad (2.33)$$

โดยที่  $c_{p,u} = c_{p,a} + \omega c_{p,v}$

$c_{p,a}$  คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของอากาศ (kJ/kg-K)

$c_{p,v}$  คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของไอน้ำ (kJ/kg-K)

จัดรูปสมการ 2.33 ใหม่ได้เป็น

$$T_s - T = \frac{(h_s - h) - h_{v,s} (\omega_s - \omega)}{c_{p,u}} \quad (2.34)$$

แทนค่าสมการที่ 2.34 ในสมการ 2.31 และแทนค่า Lewis's Number  $Le = \frac{h_c}{h_m c_{p,u} \rho_a}$

$$Q = \left\{ h_c \left[ \frac{(h_s - h) - h_{v,s} (\omega_s - \omega)}{c_{p,u}} \right] + h_L h_m \rho_a (\omega_s - \omega) \right\} dA \quad (2.35)$$

$$\text{จัดรูป } Q = \frac{h_c dA}{c_{p,u}} \left[ (h_s - h) + \left( \frac{\omega_s - \omega}{Le} \right) (h_L - Le h_{v,s}) \right]$$

(2.36)

ความหนาแน่นของอากาศชื้นจะใกล้เคียงกับความหนาแน่นอากาศแห้งและ  $Le = 1$  ได้

$h_L - h_{v,s} \approx h_{L,s}$  และทำให้เทอม  $h_{L,s} (\omega_s - \omega)$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม  $h_s - h$  เพราะฉะนั้นจะได้สมการ

$$Q = \frac{h_c dA}{c_{p,u}} (h_s - h) \quad (2.37)$$

หรือ 
$$Q = h_c (T_s - T) dA \quad (2.38)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 2.38 ก็คือสมการ 2.27 และ

$$Q_s = m_a c_{p,u} dT \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.38 และ 2.39 จะได้ว่า

$$h_c (T_s - T) dA = m_a c_{p,u} dT$$

ทำการอินทิเกรตทั้ง 2 ข้างของสมการ

$$\int_{T_{a,i}}^{T_{a,o}} \frac{dT}{(T_s - T)} = \frac{h_c}{m_a c_{p,u}} \int_0^A dA \quad (2.40)$$

$$1 - \frac{T_{a,i} - T_{a,o}}{T_{a,i} - T_s} = e^{\left( \frac{h_c A}{m_a c_{p,u}} \right)} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ 2.41 ประสิทธิภาพผิวเปียกจะหาได้จาก

$$\mathcal{E} = \left( \frac{T_{a,i} - T_{a,o}}{T_{a,i} - T_{wb}} \right) \quad (2.42)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 2.42 ก็คือสมการที่ 2.19 และ

$$\mathcal{E} = 1 - e^{\left( \frac{h_c A}{m_a c_{p,u}} \right)} \quad (2.43)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 2.43 ก็คือสมการที่ 2.20

ทำการจัดรูปสมการจะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ

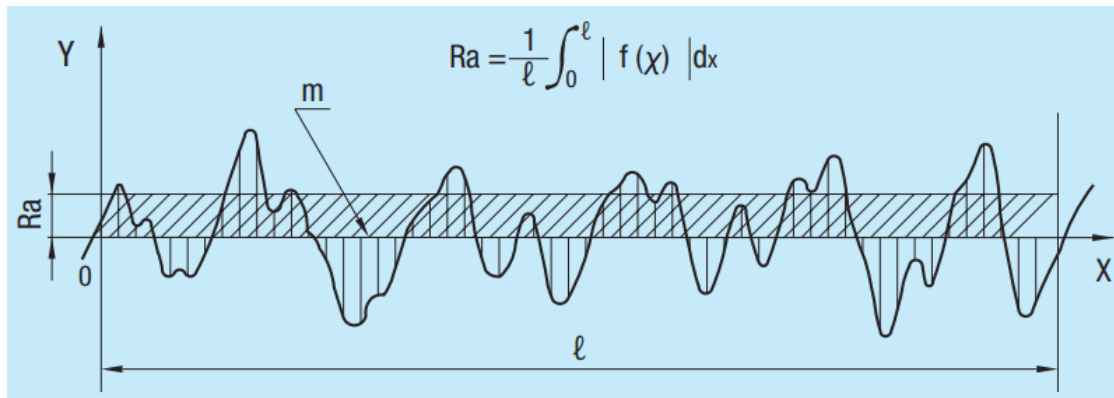
$$h_c = - \frac{\ln(1 - \mathcal{E}) \dot{m}_a c_{p,u}}{A} \quad (2.44)$$

## 2.11 การวัดความหยาบผิว

การวัดความหยาบผิวมีหลายมาตรฐานและวิธีการ ซึ่งได้แก่ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ ), ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบลจุด ( $R_z$ ), ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างช่วงกราฟไม่สม่ำเสมอ ( $S_m$ ), ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างยอดเส้นกราฟ ( $S$ ) และอัตราส่วนความยาวในช่วงเส้นกราฟ ( $t_p$ )

### 2.11.1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ )

ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นค่าความหยาบผิว ค่า  $R_a$  จะหาได้จากสมการที่แสดงบนรูปที่ 2.16 มีหน่วยเป็นไมครอน ( $\mu m$ ) เมื่อ  $y = (\chi)$

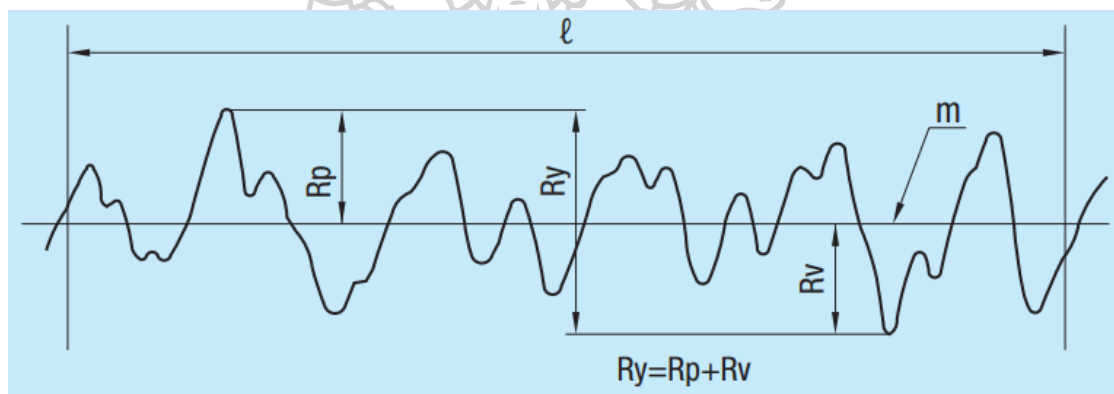


รูปที่ 2.16 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ )

“ที่มา: JIS B 0601(1994) และ JIS B 0031(1994)”

#### 2.11.2 ค่าความหยาบสูงสุด ( $R_y$ )

ค่าความหยาบสูงสุดนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงเป็นระยะที่เกิดจากกราฟสูงสุดและต่ำสุด มีหน่วยเป็นไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) (การหาค่า  $R_y$  ควรเลือกบริเวณที่มีความหยาบปกติ ไม่ควรวัดบริเวณที่มีกราฟสูงหรือต่ำผิดปกติ)

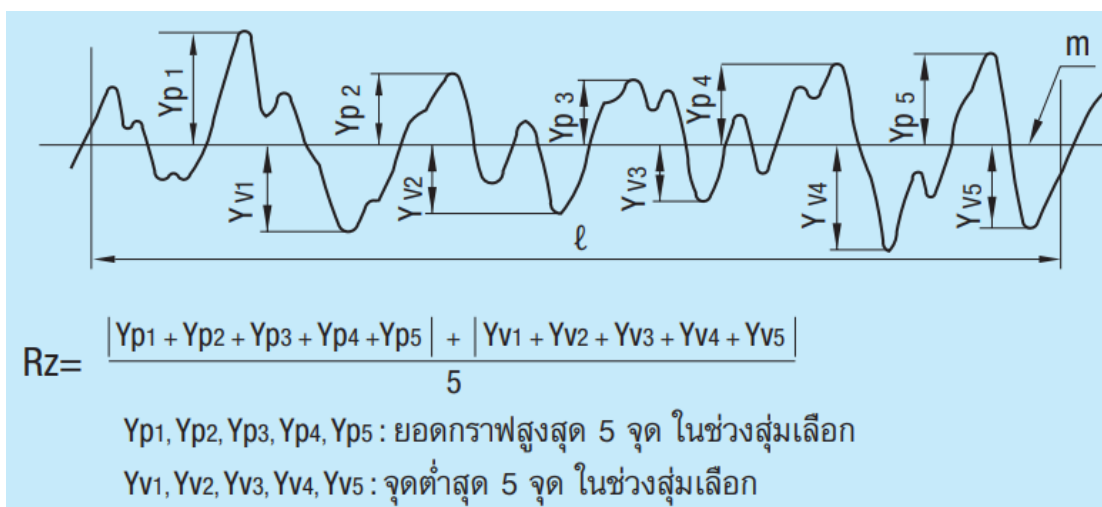


รูปที่ 2.17 ค่าความหยาบสูงสุด ( $R_y$ )

“ที่มา: JIS B 0601(1994) และ JIS B 0031(1994)”

#### 2.11.3 ค่าเฉลี่ยความหยาบพื้นผิวแบบสิบจุด ( $R_z$ )

ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงโดยคำนวณจากความสูงของยอดกราฟ 5 จุดบน และความสูงของกราฟ 5 จุดล่าง มารวมกันและหาความเฉลี่ย มีหน่วยเป็นไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) วิธีคำนวณดูได้จากรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยความหยาบพื้นผิวแบบสิบจุด (Rz)

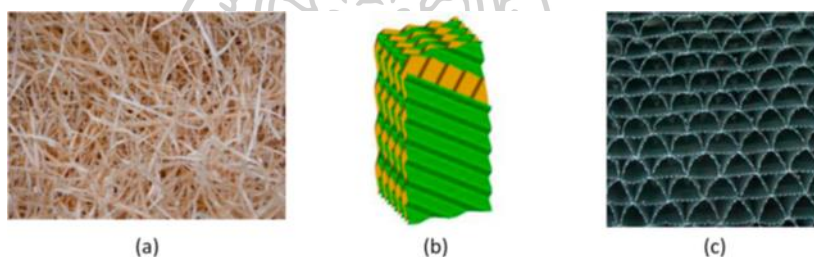
“ที่มา: JIS B 0601(1994) และ JIS B 0031(1994)”

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตผิวเปียก

สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามชนิดของวัสดุ และรูปร่างการจัดเรียงของวัสดุ ได้แก่ ผิวเปียกจากเส้นใย (Fiber pad) ผิวเปียกแบบตัวกลางแข็ง (Rigid media pad) และ ผิวเปียกแบบเติมหรือแพคเกจจ (Fill or packages pad) ดังรูปที่ 2.15 ผิวเปียกจากเส้นใยมักจะใช้เส้นใยจากพืช เช่น ใยจากต้นแอสเพน (Aspen) [8] อย่างไรก็ตามผิวเปียกจากเส้นใยอาจผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์ได้ด้วย [38] ผิวเปียกชนิดนี้เป็นแบบที่ใช้มาดั้งเดิม การศึกษาในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้เส้นใยที่หาได้จากท้องถิ่นของตนเพื่อให้ได้ผิวเปียกที่ราคาถูก และสามารถผลิตได้อย่างยั่งยืน [12-29, 39] ผิวเปียกแบบตัวกลางแข็งถูกผลิตโดยแผ่นลูกฟูกหลายแผ่นที่ยึดเข้าหากันโดยใช้กาวเรซิน ทำให้สามารถกำหนดมุมเอียงของร่อง (Flute angle) ของผิวเปียกที่สร้างขึ้นได้ ความหนาของผิวเปียกกลุ่มนี้อยู่ในช่วง 5-30 เซนติเมตร วัสดุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นลูกฟูก ได้แก่ เซลลูโลส พิวซี โพลีเอทิลีน ใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และแผ่นโลหะ ข้อดีของผิวเปียกแบบตัวกลางแข็งคือมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศมาก ไม่มีปัญหาการหลุดออกจากโครงผิวเปียกแบบที่พบบ่อยในผิวเปียกแบบเส้นใย และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [10, 11] ผิวเปียกแบบเติมหรือแพคเกจจจะเป็นผิวเปียกที่ลักษณะคล้ายวัสดุพูน ผิวเปียกชนิดนี้จะมีโครงสร้างคล้ายกล่องโปร่งสำหรับใส่วัสดุผิวเปียก วัสดุที่ใช้อาจเป็นวัสดุอนินทรีย์ (Inorganic materials) จากธรรมชาติ เช่น หินภูเขาไฟ [40] หรือวัสดุสังเคราะห์ เช่น ดินเผา ผิวเปียกแบบนี้ยังรวมถึงโครงสร้างแบบแผ่นหยด (Trickle pad) ซึ่งจะใช้ตาข่ายพลาสติกหรือโลหะบรรจุ

ในโครงสร้างผิวเปียกเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลาง [32, 41] มีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผิวเปียก ลูกฟูกที่ผลิตจากเซลลูโลสและพลาสติกพีวีซี [30] การศึกษาพบว่าเซลลูโลสให้ค่าประสิทธิผลอิมัตว์ที่ดีกว่าพลาสติกพีวีซี อย่างไรก็ตามการศึกษาที่มีความแตกต่างกันของพื้นที่จำเพาะอย่างมาก โดยผิวเปียก ลูกฟูกเซลลูโลสมีค่าพื้นที่จำเพาะมากกว่าผิวเปียกลูกฟูกพีวีซีถึง 1.5 เท่า การศึกษาโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบวัสดุเซลลูโลส พลาสติกพีวีซี และตัวกลางแบบหยด (Trickle media) พบว่าวัสดุเซลลูโลสเป็นตัวกลางผิวเปียกที่ให้ค่าที่ดีระหว่างประสิทธิผลอิมัตว์ และความดันตกคร่อม [31] กล่าวคือวัสดุเซลลูโลสให้ค่าประสิทธิผลอิมัตว์ที่ดีโดยมีความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียกไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังมีรายงานการเปรียบเทียบระหว่างเซลลูโลสและเส้นใยแก้ว (glass fiber) [38] พบว่าเส้นใยแก้วให้ค่าประสิทธิผลอิมัตว์น้อยกว่าเล็กน้อย ในขณะที่มีความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียกเส้นใยแก้วมาก นอกจากนี้ราคาค่าใยแก้วยังสูงกว่าด้วย ข้อได้เปรียบของใยแก้วเหนือเซลลูโลสคือความต้านทานต่อการติดไฟ



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของผิวเปียกที่มีรูพรุน (a) Aspen Pad (b) Rigid Media Pad (c) Packages or fill pads

ที่มา: A. Tejero-González, A. Franco-Salas, Optimal operation of evaporative cooling pads: A review, Department of Energy Engineering and Fluidmechanics, 2021”

## 2.12.2 ปัจจัยในการใช้งานผิวเปียก

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้งานผิวเปียกประกอบด้วย สภาพอากาศขาเข้า ความเร็วหรืออัตราการไหลของอากาศ รูปร่างและการจัดเรียงตัวของผิวเปียก และอัตราการไหลของน้ำ

ในส่วนของสภาพอากาศขาเข้ามีรายงานว่าประสิทธิผลอิมัตว์ ความชื้นความสามารถในการทำความเย็น และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเกเปาะแห้งที่เพิ่มขึ้น [42-45] อย่างไรก็ตามรายงานเหล่านี้ไม่ได้แสดงข้อมูลของความชื้นอากาศขาเข้า ในแง่ของการจำลองสภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีการรายงานว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกเปาะแห้งของอากาศขาเข้าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น [46] นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ของอากาศขาเข้าอีกด้วย การศึกษาพบว่าเมื่อความชื้น

สัมพัทธ์มีค่าลดลง อุณหภูมิอากาศขาออกจะมีค่าลดลง [47, 48] นอกจากการพิจารณาพจน์ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ของอากาศขาเข้าแล้ว การพิจารณาผลของความชื้นในอากาศขาเข้ายังถูกทำผ่านพจน์การลดลงของกะเปาะเปียก (Wet bulb depression: WBD) ซึ่งเป็นพจน์ที่สะท้อนปริมาณความชื้นในอากาศผ่านผลต่างของอุณหภูมิอากาศกะเปาะแห้งกับอุณหภูมิอากาศกะเปาะเปียกที่เกิดขึ้นได้ในอุดมคติ การศึกษาพบว่ายิ่งค่าการลดลงของกะเปาะเปียกมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ความชื้นในอากาศขาออกมีค่าเพิ่มขึ้น [49] ในการศึกษาผลของความชื้นของอากาศขาเข้าผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่า การใช้น้ำในระบบทำความเย็นแบบระเหยจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่ออากาศขาเข้าแห้งมากโดยมีความชื้นสัมพัทธ์ 10-20% [50] หรืออีกนัยหนึ่งคืออุณหภูมิของอากาศขาออกจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของอากาศขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น [51] เมื่อพิจารณามาถึงตอนนี้จะพบว่าอุณหภูมิกะเปาะแห้ง และความชื้นในอากาศขาเข้าส่งผลอย่างมากต่อการทำความเย็นแบบระเหย อย่างไรก็ตามก็มียางานในทางตรงข้ามที่แสดงผลการศึกษาว่าปัจจัยทั้งสองนี้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพอิมตัวในระบบทำความเย็นแบบระเหย Wu et al. [52] รายงานว่าอุณหภูมิกะเปาะแห้ง หรืออุณหภูมิกะเปาะเปียกของอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพอิมตัว เมื่อทดลองที่ความเร็วอากาศ 2 m/s และความหนาผิวเปียกที่ทำจากใยแก้วหนา 138 มิลลิเมตร ปัจจัยที่ทำให้ผลลัพธ์การศึกษามีความแตกต่างกันคือการเปียกอย่างเพียงพอของผิวเปียก ในกรณีที่น้ำไม่สามารถเคลือบพื้นผิวเปียกได้อย่างเพียงพอประสิทธิภาพอิมตัว (ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการระเหยน้ำ และความชื้นของอากาศขาออก)จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้า ในทางตรงข้ามหากน้ำสามารถเคลือบผิวเปียกได้อย่างเพียงพอแล้ว อุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้าจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพอิมตัว เมื่อพิจารณาอากาศขาเข้าที่มีอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) คงที่ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้าไม่ทำให้อัตราส่วนความชื้นเปลี่ยนแปลง หากอากาศนี้ไหลผ่านผิวเปียกที่ไม่มีน้ำเคลือบพื้นผิวอย่างเพียงพอ ความชื้นในอากาศจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิมตัวได้ ส่งผลให้พจน์ WBD ไม่คงที่ ณ.ค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าหนึ่ง แต่จะเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำที่อยู่บนพื้นผิวเปียก ทำให้ค่าประสิทธิภาพอิมตัวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้ากับค่าประสิทธิภาพอิมตัวอาจใช้สังเกตได้ว่ามีน้ำเคลือบอยู่บนผิวเปียกอย่างเพียงพอหรือไม่ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองควรหลีกเลี่ยงการพิจารณาผลของอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศขาเข้าเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาร่วมกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า หรือพิจารณาในรูปของพจน์การลดลงของกะเปาะเปียก (WBD)

ในส่วน củaความเร็วและอัตราการไหลของอากาศ มีรายงานว่าความเร็วอากาศที่มีค่ามากส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพอิมตัวลดลง [41, 53-55] และผลต่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและออกมีค่าลดลง [24] ในขณะที่มันทำให้ความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียก [32, 43, 56] อัตราการใช้น้ำ (Water consumption) [44, 56, 57] และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวล [32, 56] มีค่า

เพิ่มขึ้น ความเร็วอากาศสูงยังทำให้เกิดสนามการไหลของอากาศเข้าที่ไม่ดีในบริเวณทางเข้าของแผ่นผิวเปียก [55] สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเวลาที่อากาศสัมผัสกับน้ำ (Residence times) มีค่าลดลงเมื่อความเร็วอากาศมีค่าสูงขึ้น [28] อย่างไรก็ตามก็พบว่ามีการวิจัยที่แสดงการลดลงเล็กน้อยของค่าประสิทธิภาพอัดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศในช่วงความเร็วต่ำ ในช่วง 0.25 – 2 เมตรต่อวินาที [13, 32, 40, 41, 58] การกำหนดความเร็วที่เหมาะสมของอากาศเข้าจะขึ้นกับความหนาผิวเปียก ชนิดและการจัดเรียงของวัสดุที่ใช้ทำผิวเปียก ดังนั้นจึงไม่มีค่ากลางในการออกแบบที่ใช้ได้กับวัสดุผิวเปียกทุกชนิด การพิจารณาว่าความเร็วอากาศที่เหมาะสมจะใช้เกณฑ์การให้ค่าประสิทธิภาพอัดตัวที่ดี การมีค่าความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียกต่ำ และมีอัตราการใช้น้ำน้อย [50] สำหรับแผ่นผิวเปียกชนิดตัวกลางของแข็ง (Rigid medium pad) ที่ผลิตจากเซลลูโลสความหนา 100 มิลลิเมตร ความเร็วที่แนะนำให้ใช้งานอยู่ในช่วง 1-1.5 เมตรต่อวินาที [54] ที่ความเร็วอากาศนี้ ประสิทธิภาพอัดตัวอยู่ในช่วง 64-70% ความดันอากาศตกคร่อมมีค่าในช่วง 3.9-11.25 Pa และอัตราการระเหยน้ำอยู่ในช่วง  $1.8-2.62 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$  [59]

### 2.12.3 รูปร่างและการจัดเรียงตัวของวัสดุผิวเปียก

ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างและการจัดเรียงตัวของวัสดุผิวเปียกคือ ความหนาของผิวเปียก ตัวแปรนี้ส่งผลถึงระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านผิวเปียก และเวลาที่อากาศสัมผัสกับน้ำ (Residence times) การส่งผ่านมวลและความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่อากาศสัมผัสกับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น รายงานวิจัยส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาผิวเปียกส่งผลให้ประสิทธิภาพอัดตัว และอัตราการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลต่างอุณหภูมิอากาศเข้าและออกมีค่าลดลง [32, 50, 52, 55, 60] สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือความเร็วของอากาศเข้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพอัดตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อความหนาแผ่นผิวเปียกมีค่าเพิ่มมากขึ้น [58] นั่นหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาผิวเปียกทำให้มีโอกาสที่น้ำจะเคลือบผิวสัมผัสได้อย่างเพียงพอ จนอากาศสามารถซับน้ำที่ระเหยออกมาได้จนถึงจุดอัดตัว ดังนั้นจึงมีความหนาที่เหมาะสมสำหรับความเร็วอากาศค่าหนึ่งที่กำหนด หากความหนามากกว่าค่านี้แล้ว จะไม่มีผลต่อการทำความเย็นแบบระเหย แต่จะส่งผลให้เกิดความดันอากาศตกคร่อมมากขึ้น เสียพลังงานในพัดลมมากขึ้น และมีต้นทุนค่าผิวเปียกที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความหนาผิวเปียกที่มากขึ้นส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการเดินระบบยาวนานขึ้นเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) [61]

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการศึกษารูปร่างและการจัดเรียงตัวของผิวเปียกคือ พื้นที่จำเพาะ (Specific area: A) ตัวแปรนี้แสดงพื้นที่ที่มีการส่งผ่านมวลและความร้อนต่อปริมาตรของผิวเปียก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัส ( $A_s$ ) ปริมาตรของผิวเปียก (V) และพื้นที่จำเพาะที่มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2/\text{m}^3$  จึงเป็นดังนี้

$$A = \frac{A_s}{V} \quad (2.45)$$

และเมื่อกำหนดให้มีตัวแปรความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length:  $L_e$ ) ซึ่งมีนิยามคือ อัตราส่วนของปริมาตรผิวเปียกหารด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียก ( $A_s$ ) ดังสมการ (2.43)

$$L_e = \frac{V}{A_s} \quad (2.46)$$

แนวคิดของความยาวคุณลักษณะนี้จะเสมือนกับว่ามีการพิจารณาผิวเปียกทั้งหมดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมตันที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของผิวเปียก และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นค่าความยาวคุณลักษณะจึงแตกต่างจากค่าความหนาของผิวเปียก เมื่อพิจารณาค่าความยาวคุณลักษณะร่วมกับค่าความหนาของผิวเปียกจะสามารถสร้างตัวแปรไร้มิติ  $L_e/L$  ได้ดังนี้

$$\frac{L_e}{L} = \frac{V}{A_s L} = \frac{1}{AL} \quad (2.47)$$

ตัวแปรไร้มิตินี้ถูกใช้พิจารณาร่วมกับอัตราการไหลของน้ำ และอากาศ เพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพลมตัว ความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียก และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวลและความร้อน [30, 32, 41, 44, 50, 53, 62, 63] มีรายงานว่าเมื่อพื้นที่จำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นความดันอากาศตกคร่อมจะมีค่าค่อยๆ ลดลง [46] ความหนาผิวเปียกที่เหมาะสมถูกแนะนำไว้ที่ 70 มิลลิเมตร [50] หรืออยู่ในช่วง 50-100 มิลลิเมตร [64] หรือ 140 mm [44]

สำหรับผิวเปียกแบบตัวกลางของแข็ง (Rigid medium pad) มีการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างร่องแผ่น (Flute) และมุมเอียงของร่องแผ่น ระยะห่างระหว่างร่องแผ่นที่น้อยลงจะส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการทำความเย็นแบบระเหย [65] และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นลูกฟูกกับแผ่นเรียบจะพบว่าที่ความเร็วอากาศ 2.5 เมตร/วินาที แผ่นลูกฟูกทำให้เกิดความดันอากาศตกคร่อมแผ่นผิวเปียกมากกว่าแผ่นเรียบ 25% ในขณะที่ประสิทธิภาพลมตัวมากกว่าแผ่นเรียบ 40% [61]

#### 2.12.4 อัตราการไหลของน้ำ

การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำทำให้การใช้พลังงานของปั๊มน้ำเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำส่งผลดีในแง่ของการชำระล้างตะกอนในระบบผิวเปียก ป้องกันการอุดตันบนผิวเปียก และการจับฝุ่นและสิ่งสกปรกที่มากับอากาศเข้า ในทางตรงข้ามการลดอัตราการไหลของน้ำอาจทำให้น้ำไม่สามารถเคลือบพื้นผิวเปียกได้อย่างเพียงพอทำให้ประสิทธิภาพลมตัวมีค่าลดลง แม้จะมีรายงานว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพลมตัวมีค่าเพิ่มขึ้น [41, 43, 44] แต่การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลต่อประสิทธิภาพลมตัวน้อยมาก เมื่อผิวเปียกมีน้ำเคลือบผิวสัมผัสอย่างเพียงพอ [30, 40, 63, 66, 67]

ในแง่ของความดันตกคร่อมผิวเปียกของอากาศ การศึกษาผิวเปียกเซลล์ลูโลสทั่วไป และใยแก้วเปรียบเทียบกับผิวเปียกแห้งที่ไม่เปียกน้ำ พบว่าการไหลของน้ำเคลือบผิวเปียกทำให้ความต้านทานการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [38, 63, 68, 69] มีรายงานว่าความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียกอาจมีค่าเพิ่มขึ้น 11.7 – 14.6% [68] เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น เป็นสองเท่าของค่าที่แนะนำไว้โดย ASABE [8]

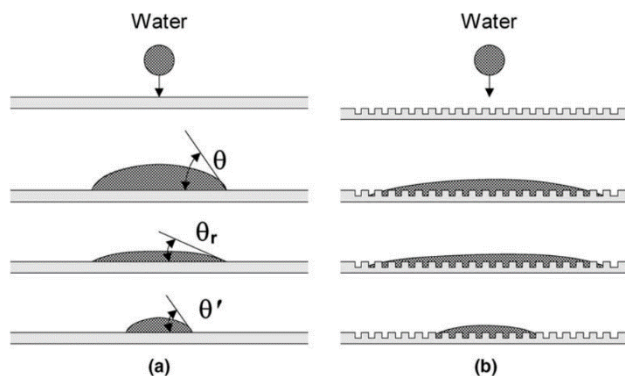
จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะพบว่าปัจจัยที่ควรพิจารณาในการทดสอบผิวเปียก คือ สภาพอากาศเข้าซึ่งควรพิจารณาอุณหภูมิเกาะเปียกเป็นคู่ไปกับค่าความชื้นในอากาศ ความเร็วของอากาศซึ่งค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-1.5 เมตรต่อวินาที ความหนาผิวเปียก ความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียก และอัตราการไหลของน้ำ ในแง่ของการเลือกใช้วัสดุจะพบว่าในปัจจุบัน ลูกฟูกเซลล์ลูโลสเป็นตัวเลือกที่ดี แต่อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดในด้านราคา ความทนทาน การเกิดตะกรัน และการอุดตัน การพัฒนาผิวเปียกจากเส้นใยธรรมชาติในท้องถิ่นแม้ว่าจะมีราคาค่าวัสดุที่ถูกลง แต่ปัญหาประสิทธิภาพลุ่มตัวที่ต่ำ ความดันอากาศตกคร่อมผิวเปียกสูง และการเกิดเกล็ดจากการย่อยสลาย ยังคงเป็นปัญหาสำคัญในการใช้งาน สำหรับวัสดุพลาสติกนั้น เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นผิวเปียกเนื่องจากความทนทาน ราคาที่ไม่สูงมากนัก และสามารถหาได้ในทุกพื้นที่ทั้งแบบ วัสดุรีไซเคิลและขยะ แม้ว่าจะพลาสติกจะมีคุณลักษณะการทำความเย็นที่ดีกว่าผิวเปียกลูกฟูกเซลล์ลูโลส แต่การเปรียบเทียบทำโดยมีเงื่อนไขพื้นที่จำเพาะที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีข้อมูลการศึกษาที่จำกัดเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถในการจับน้ำบนพื้นผิวพลาสติก ดังนั้นการศึกษาข้อมูลของมุมเปียก ความต้านทานการไหลของน้ำ และอากาศของผิวพลาสติกทั้งแบบปกติและแบบที่มีการเพิ่มความสามารถในการจับน้ำบนพื้นผิวพลาสติกเปรียบเทียบกับผิวเปียกทางการค้า รวมทั้งการศึกษาคูณลักษณะการทำความเย็นและความดันอากาศตกคร่อมของพลาสติกทั้งสองชนิด จะทำให้การออกแบบและสร้างผิวเปียกชนิดตัวกลางแบบแข็ง (Rigid medium pad) ที่ใช้พลาสติกเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพสูงเกิดขึ้นได้

#### 2.12.5 การยึดเกาะของน้ำบนวัสดุผิวเปียก

การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำให้เพียงพอทำให้ประสิทธิภาพลุ่มตัวมีค่าสูงขึ้นได้ [41, 43, 44] แต่ก็เพิ่มพลังงานในส่วนของปั้มน้ำเช่นกัน จึงมีวิธีการเพื่อทำให้ผิวเปียกมีการเคลือบน้ำอย่างเพียงพอโดยไม่เพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ทำได้โดยการเพิ่มความหยาบบนผิววัสดุที่นำมาใช้เป็นผิวเปียก

จากการศึกษาพบว่าถ้าหากผิววัสดุมีความหยาบจะทำให้การกระจายน้ำบนแผ่นผิววัสดุกระจายได้ดีกว่า และเคลือบแผ่นผิวเป็นฟิล์มบางๆ [36] ดังรูปที่ 2.20 และยังพบอีกว่า การระเหยของหยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิววัสดุที่เป็นแบบเรียบจะมีอัตราการระเหยของน้ำต่ำกว่าผิววัสดุที่มี

ความหยาบ ที่มวลของน้ำเท่ากันอีกด้วย [36] จึงพอสรุปได้ว่าหากมีการเพิ่มความหยาบของผิววัสดุ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพผลอิมตัวของผิวเปียกได้ที่อัตราการไหลของน้ำที่เท่ากัน



รูปที่ 2.20 ลักษณะการยิดเกาะของน้ำบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาบ

“ที่มา: C.-C. Hsieh, S.-C. Yao, Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (2006) 962-974.”

#### 2.12.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบระเหย

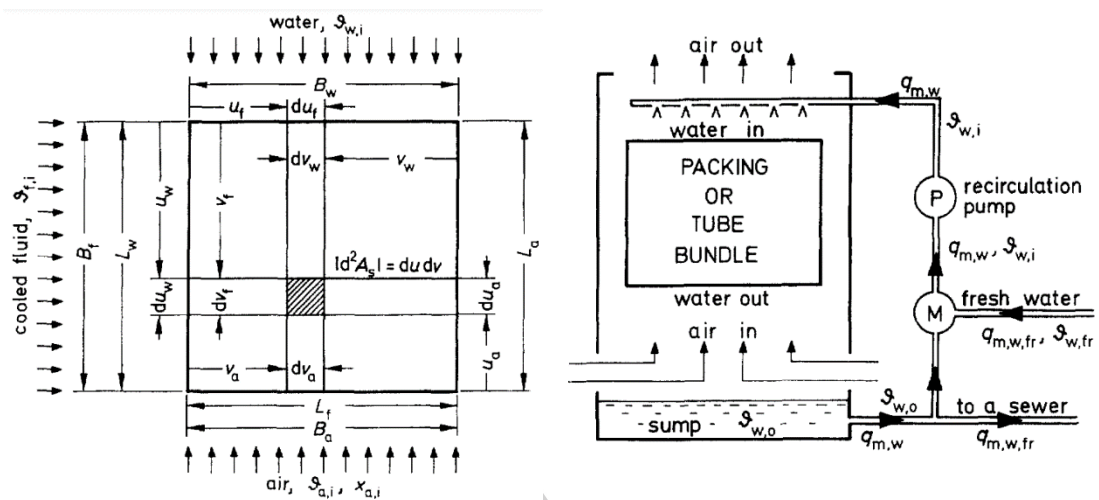
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบระเหย ใช้อธิบายพฤติกรรมของอุณหภูมิอากาศขาเข้า (Inlet Air Temperature), อุณหภูมิอากาศขาออก (Outlet Air Temperature), ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity), พื้นที่ผิววัสดุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness Surface Area), อัตราการไหลของอากาศและน้ำป้อน (Mass Flowrate of Air and Water) และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบ (Convective Heat Transfer Coefficient)

ในงานวิจัยก่อนหน้ามีการตั้งปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของระบบหลายแบบ [70-73] ดังรูปที่ 2.21 – 2.24 แต่เมื่อจัดรูปสมการและพิจารณาปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขต จะทำให้ได้ประสิทธิภาพผลอิมตัว ออกมาในรูปของสมการที่ 2.48 และ 2.49 ทั้งสิ้น

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = \left( \frac{T_{\text{db},i} - T_{\text{db},e}}{T_{\text{db},i} - T_{\text{wb}}} \right) \quad (2.48)$$

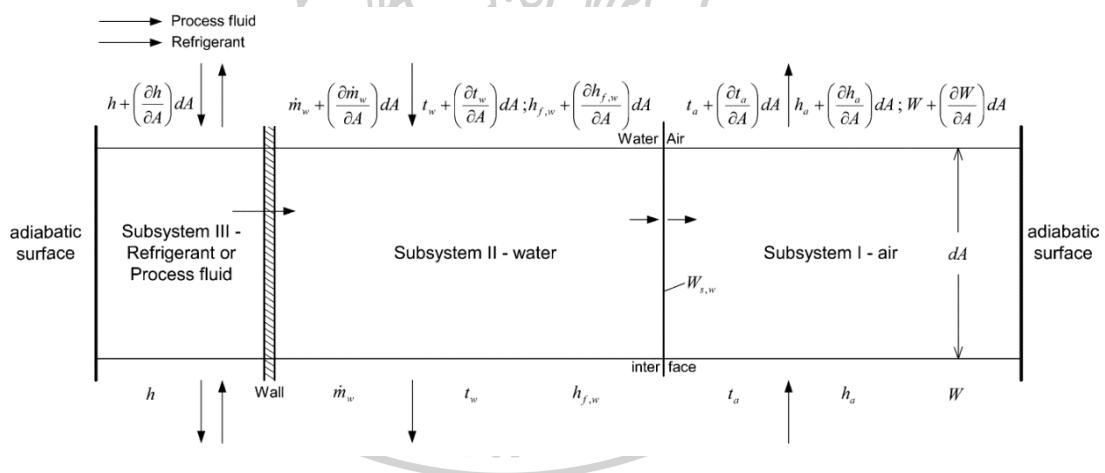
และ

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = 1 - \exp \left( - \frac{h_c A_s}{\dot{m}_a c_{p,u}} \right) \quad (2.49)$$



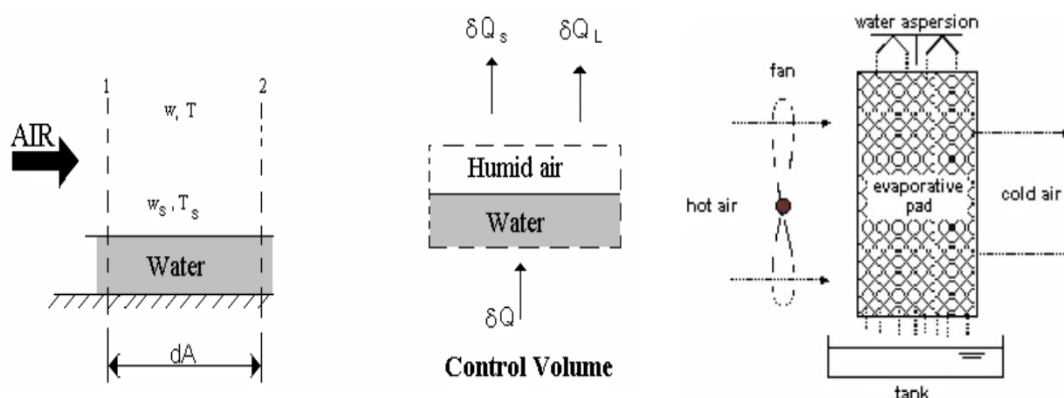
รูปที่ 2.21 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Boris Halasz

“ที่มา: B. Halasz, A General Mathematical Model of Evaporative Cooling Devices, Rev Gen Therm, 37 (1998) 245-255.”



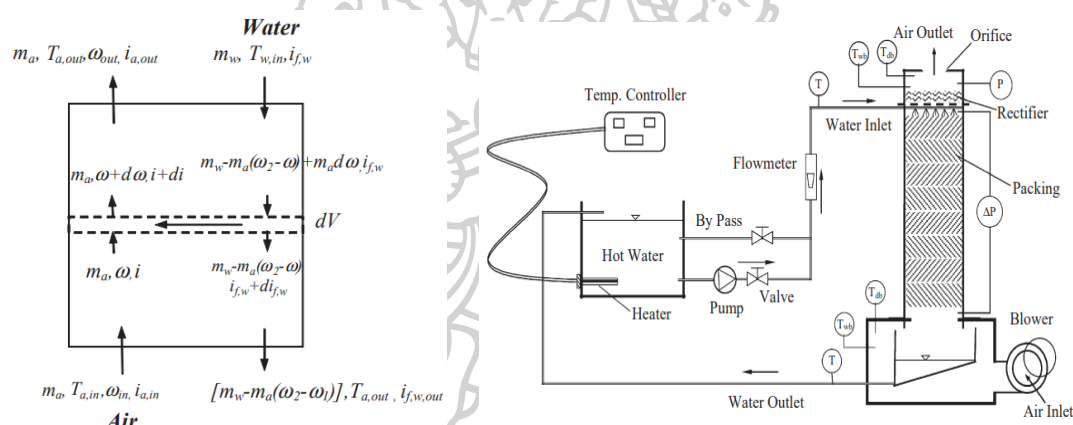
รูปที่ 2.22 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขต Evaporative Fluid Cooler ของ Qureshi

“ที่มา: B.A. Qureshi, S.M. Zubair, A comprehensive design and rating study of evaporative coolers and condensers. Part I. Performance evaluation, International Journal of Refrigeration, 29 (2006) 645-658.”



รูปที่ 2.23 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Camargo

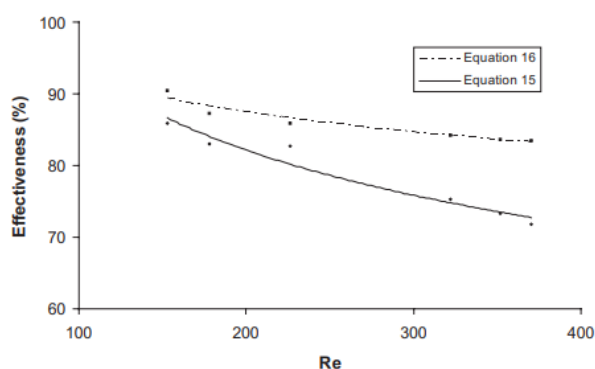
“ที่มา: C.D.E. J. R. Camargo, S. Cardoso, A Mathematical Model for Direct Evaporative Cooling Air Conditioning System, Engenharia Térmica, 4 (2003) 30-34.”



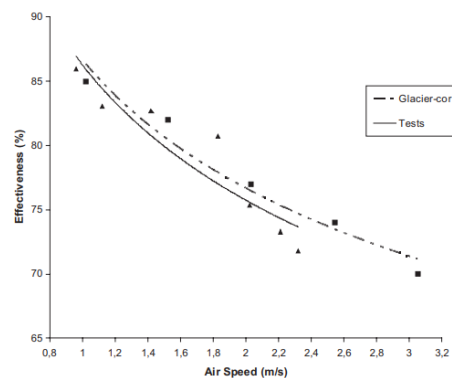
รูปที่ 2.24 ปริมาตรควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตของ Paisarn

“ที่มา: P. Naphon, Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower, International Communications in Heat and Mass Transfer, 32 (2005) 1066-1074.”

จากการศึกษายังพบอีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของสมการที่ 2.48 และ 2.49 ประสิทธิภาพลัทธิมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง [72-74] ดังรูปที่ 2.25 และ 2.26

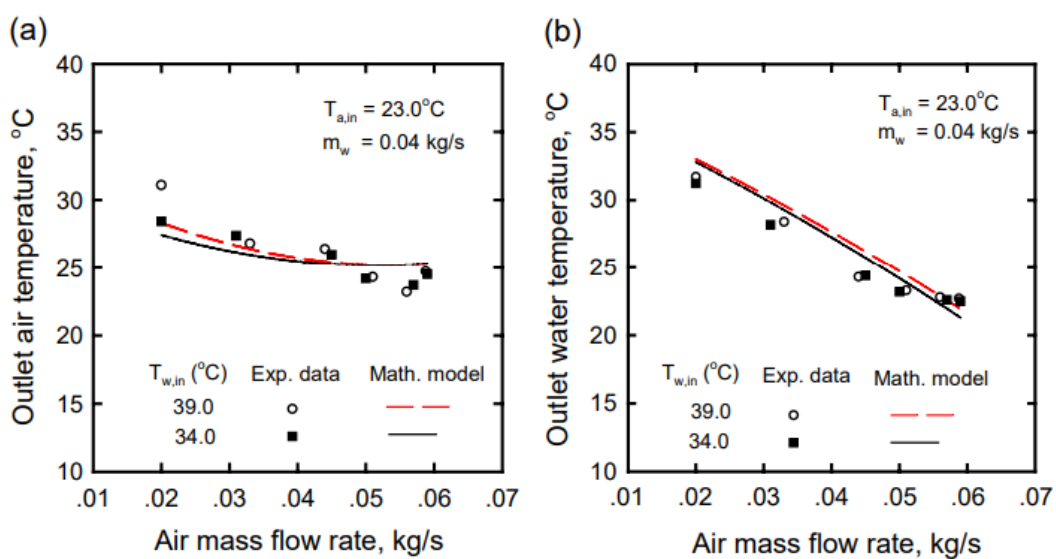


ก. Effectiveness x Re



ข. Effectiveness x Air Speed

รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพลมตัวต่อเรย์โนลด์สและความเร็วของอากาศจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Camargo  
 “ที่มา: C.D.E. J. R. Camargo, S. Cardoso, A Mathematical Model for Direct Evaporative Cooling Air Conditioning System, Engenharia Térmica, 4 (2003) 30-34.”



รูปที่ 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอากาศด้านออกและน้ำด้านออกต่อความเร็วของอากาศจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Naphon  
 “ที่มา: P. Naphon, Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower, International Communications in Heat and Mass Transfer, 32 (2005) 1066-1074.”

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

ในโครงการวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วน คือ การทดสอบคุณลักษณะของพื้นผิวเรียบและหยาบ การทดสอบคุณลักษณะในการทำความเย็นเมื่อใช้เป็นผิวเปียก และการเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เป้าหมายในการศึกษาส่วนแรก คือ การทราบถึงค่าความหยาบของผิวโดยวิธีวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ในหน่วยไมโครเมตร, การทราบถึงลักษณะทางกายภาพของน้ำที่เกาะบนแผ่นผิวทดสอบพีวีซีและการอิมตัวของแผ่นผิวเปียก ข้อมูลเหล่านี้จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการเคลือบผิวสัมผัสของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดผลของแรงคาปิลลารีบนพื้นผิว ข้อมูลนี้จะทำให้สามารถประเมินระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับอากาศ (Residence time) ซึ่งส่งผลต่อความเข้าใจเกี่ยวกับความหยาบของผิวที่เหมาะสมสำหรับผิวเปียก และการใช้พลังงานในระบบปั้มน้ำสำหรับการทำความเย็นแบบระเหย สำหรับข้อมูลการศึกษาพื้นที่ผิวเปียกประสิทธิภาพจะทำให้สามารถประเมินพื้นที่สัมผัสน้ำจริง เนื่องจากพลาสติกพีวีซีปกติมีลักษณะไม่ชอบน้ำ ดังนั้นพื้นที่ผิวจริงและพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้ำเคลือบอยู่จึงอาจมีความแตกต่างกัน

เป้าหมายในการศึกษาส่วนที่สอง คือ การศึกษาผลของการนำพื้นผิวหยาบจากการศึกษาในส่วนแรกมาใช้เป็นวัสดุผิวเปียก และเปรียบเทียบกับพลาสติกพีวีซีที่ไม่ได้ปรับปรุงสภาพพื้นผิว การศึกษาในส่วนนี้จะพิจารณาค่าประสิทธิภาพอิมตัว ความสามารถในการทำความเย็น และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การพิจารณาเปรียบเทียบจะใช้เงื่อนไขคือ ปริมาตรชุดทดสอบที่เท่ากัน มีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เท่ากัน และทดสอบที่ความเร็วอากาศสุบสายคือ 0.25 เมตรต่อวินาที

สำหรับเป้าหมายในการศึกษาส่วนที่สาม คือ การเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้าเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้ผิวเปียกพีวีซีที่มีการปรับปรุงผิวทดแทน การศึกษาจะไม่ทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการวิจัยในโครงการนี้เป็นการศึกษาวิจัยวัสดุต้นแบบที่ยังไม่สามารถกำหนดกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ต้นทุนต่างๆ ในกระบวนการผลิตจึงอาจคลาดเคลื่อนได้สูง

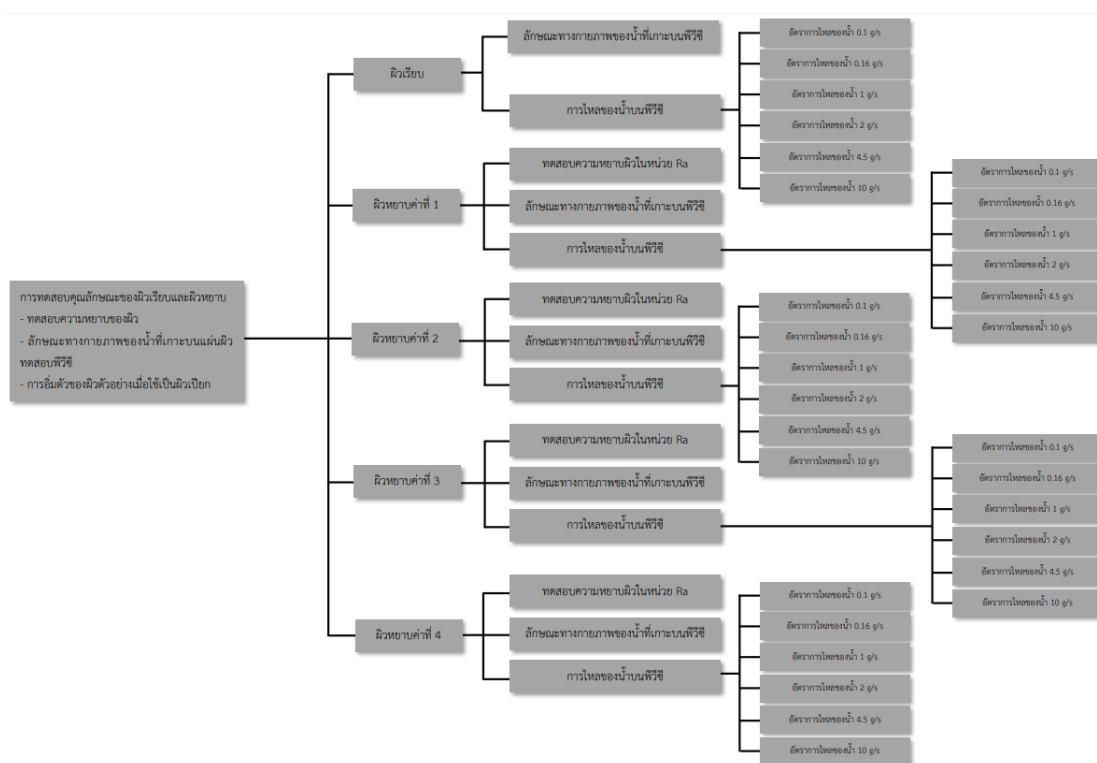


รูปที่ 3.1 แผนผังงานวิจัย

### 3.2 วิธีการดำเนินงาน

#### 3.2.1 การทดสอบคุณลักษณะของผิวเรียบและผิวหยาบ

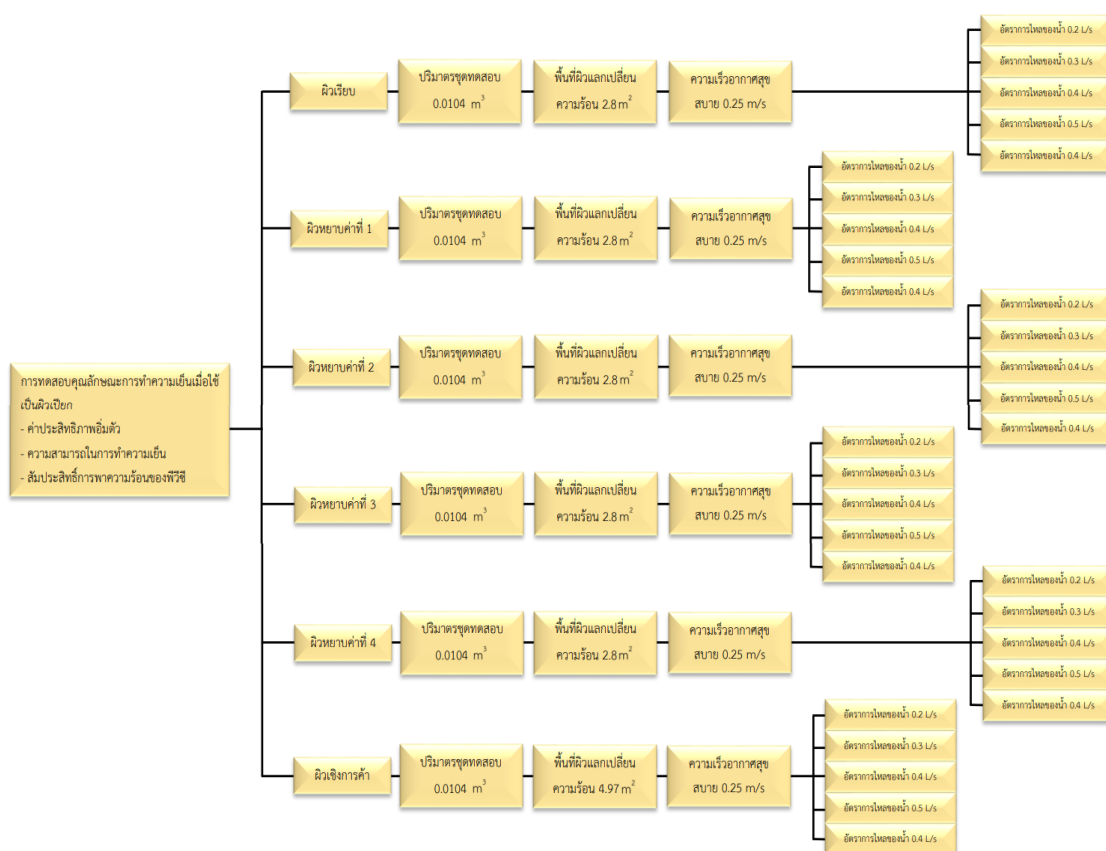
แผนการทดลองในโครงการวิจัยในส่วนการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวที่มีความหยาบ การทดลองจะวัดค่าความหยาบของผิวตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างโดยวิธีวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ในหน่วยไมโครเมตร และความอ้อมตัวของผิวตัวอย่างเมื่อใช้เป็นผิวเปียก เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดแล้ว นำผิวเปียกที่สร้างขึ้นไปใช้ในการทดลองในส่วนของการทดสอบคุณลักษณะในการทำความเย็นเมื่อใช้เป็นผิวเปียก และการเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้าต่อไป



รูปที่ 3.2 แผนการทดลองในโครงการวิจัยในส่วนการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวที่มีความหยาบ

### 3.2.2 การทดสอบคุณลักษณะการทำความเย็นเมื่อใช้เป็นผิวเปียก

แผนการทดลองในโครงการวิจัยส่วนของการทดลองในส่วนของการทดสอบคุณลักษณะในการทำความเย็นเมื่อใช้เป็นผิวเปียก และการเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้า เมื่อพิจารณาความเร็วอากาศเข้าสำหรับความเร็วอากาศสุขสบายคือ 0.25-0.5 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงกำหนดความเร็วอากาศ 0.25 เมตรต่อวินาทีเป็นความเร็วทดสอบ และกำหนดให้ค่าปริมาตรและพื้นที่ของวัสดุผิวเปียกพีวีซีในทุกการทดลองมีค่าเท่ากัน และเปรียบเทียบกับพื้นผิวเชิงการค้าที่ปริมาตรทดสอบเท่ากัน การเปรียบเทียบจะกำหนดสภาพอากาศเข้าที่ 31-35 องศาเซลเซียส ในการศึกษาจะแปรค่าอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปรับปรุงสภาพผิว โดยในการศึกษาจะแปรค่าอัตราการไหลของน้ำ 5 ค่าต่อชนิดของวัสดุผิวเปียก สำหรับตัววัสดุที่ศึกษาจะใช้แผ่นพีวีซีเรียบ แผ่นพีวีซีที่มีความหยาบ 5 ตัวอย่าง และผิวเปียกทางการค้า

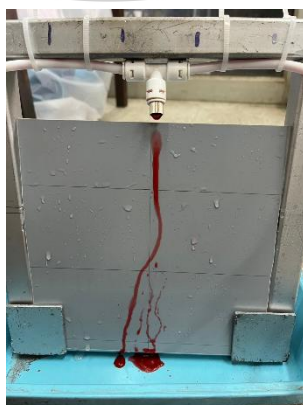


รูปที่ 3.3 แผนการทดลองในโครงการวิจัยส่วนของการทดลองในส่วนของการทดสอบคุณลักษณะในการทำความเย็นเมื่อใช้เป็นฉนวน และการเปรียบเทียบกับฉนวนเชิงการค้า

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.3.1 ชุดทดสอบการไหลของน้ำบนพีวีซี

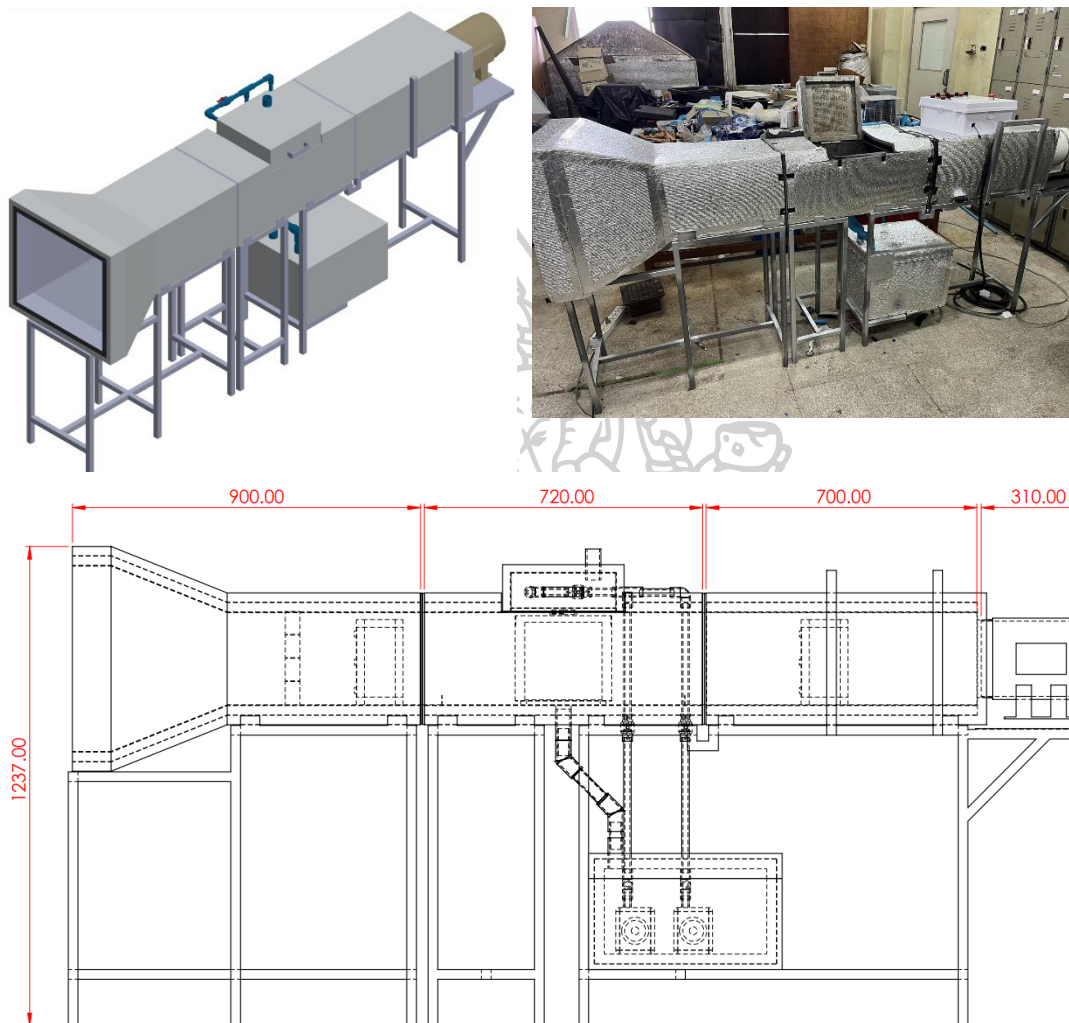
ชุดทดสอบการไหลของน้ำบนพีวีซี



รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบการไหลของน้ำบนพีวีซี

### 3.3.2 ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling)

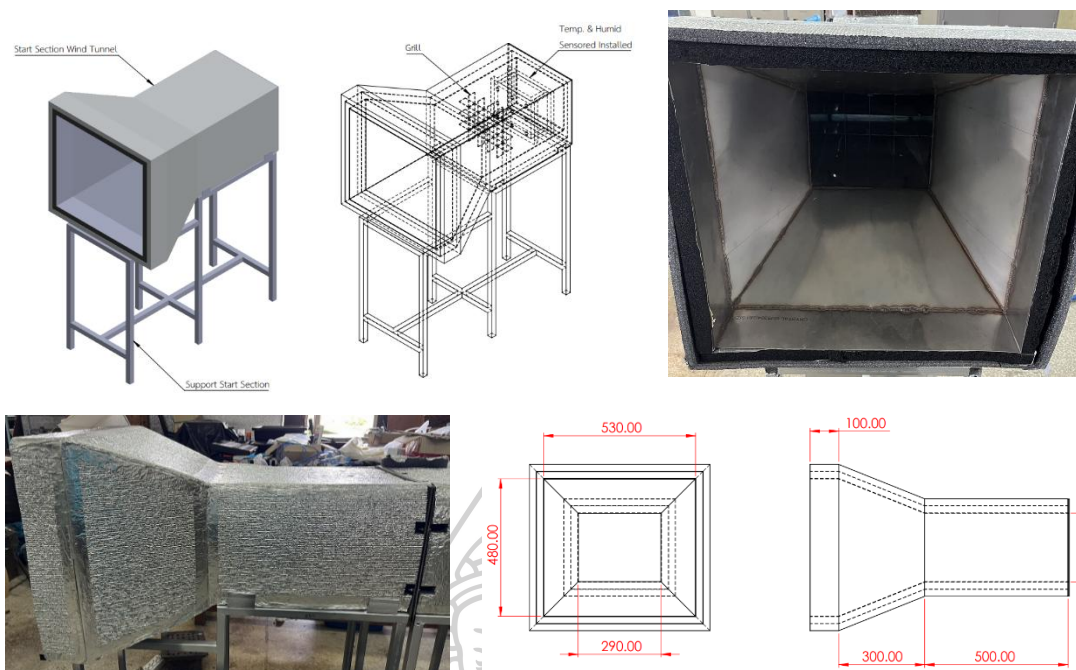
ชุดทดสอบออกแบบเป็นอุโมงค์ลมโดยแบ่งเป็นทั้งหมด 4 ส่วน คือ ส่วนเริ่มต้น (Start Section), ส่วนชุดทดสอบ (Test Section) และส่วนพัดลม (Fan Section) ทุกส่วนหุ้มด้วยฉนวนแอโรเพล็กและฉนวน PE ส่วนสุดท้ายคือส่วนติดตั้งเซ็นเซอร์



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบระเหย

#### 3.3.2.1 ส่วนเริ่มต้น (Start Section)

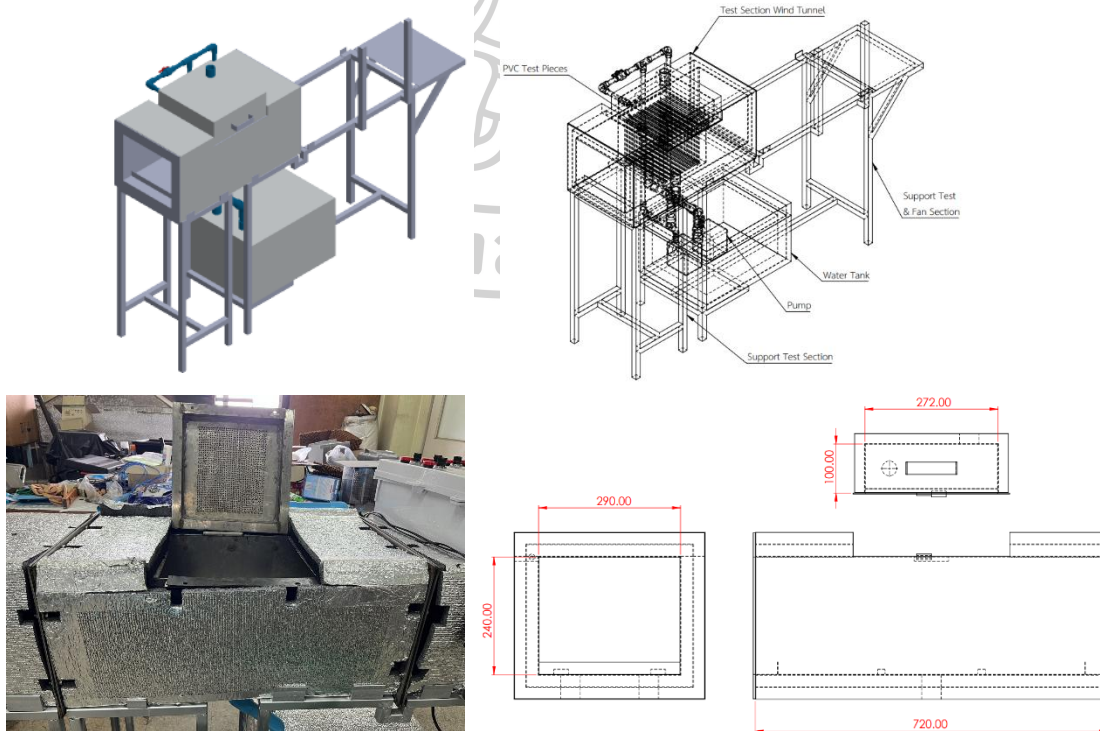
ส่วนเริ่มต้นจะออกแบบโดยใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นปากแตรและมิกริลด้านในเพื่อให้ลมไหลผ่านได้ดีขึ้นและทำให้ลมไม่ไหลแบบปั่นป่วน หุ้มด้วยฉนวนแอโรเพล็กหนา 1 นิ้ว และฉนวน PE 1 ด้านหนา 15 mm.



รูปที่ 3.6 ส่วนเริ่มต้น (Start Section)

### 3.3.2.2 ส่วนชุดทดสอบ (Test Section)

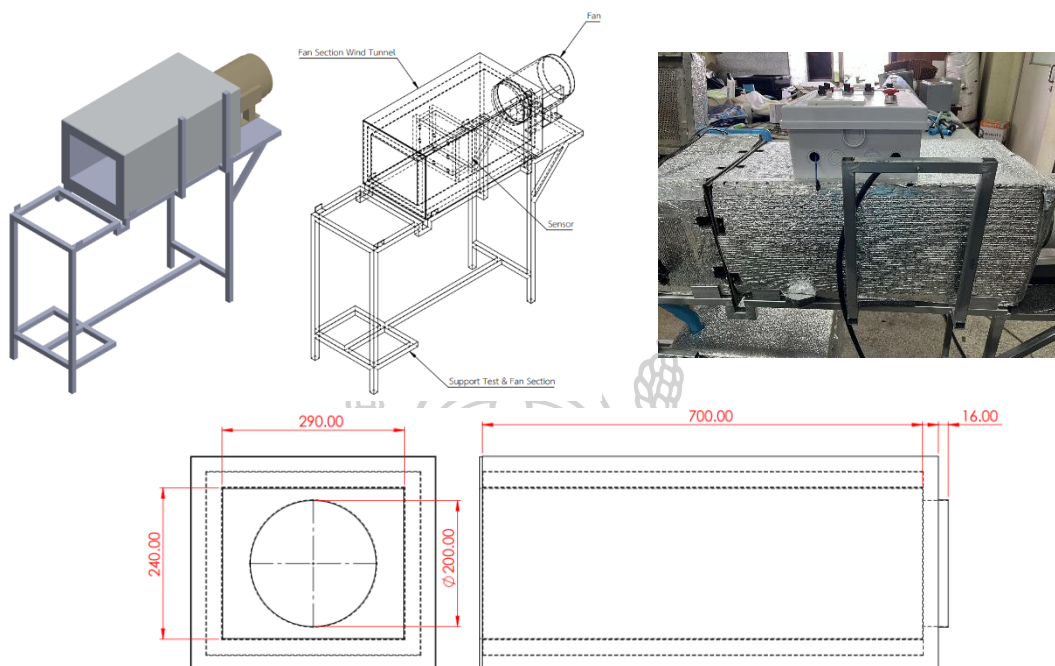
ส่วนของชุดทดสอบเป็นส่วที่ใช้ทดสอบผิวเปลือกแบบต่างๆ ออกแบบเป็นอุโมงค์ลม และใช้ปั้มและหัวพ่นหมอกให้กับผิวเปลือก



รูปที่ 3.7 ส่วนชุดทดสอบ (Test Section)

### 3.3.2.3 ส่วนพัดลม (Fan Section)

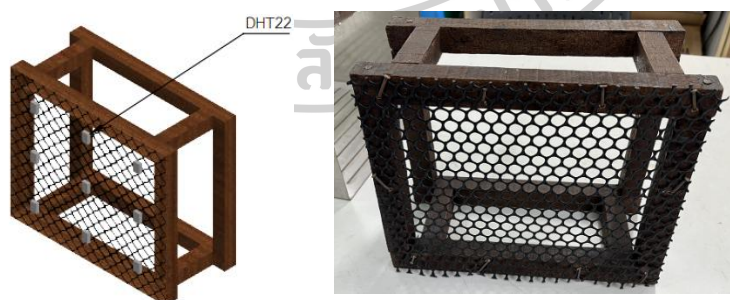
ส่วนพัดลมเป็นส่วนสุดท้ายของชุดทดสอบ ออกแบบติดกับพัดลม ตัวพัดลมใช้ตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วลมได้



รูปที่ 3.8 ส่วนพัดลม (Fan Section)

### 3.3.2.4 ส่วนติดตั้งเซ็นเซอร์

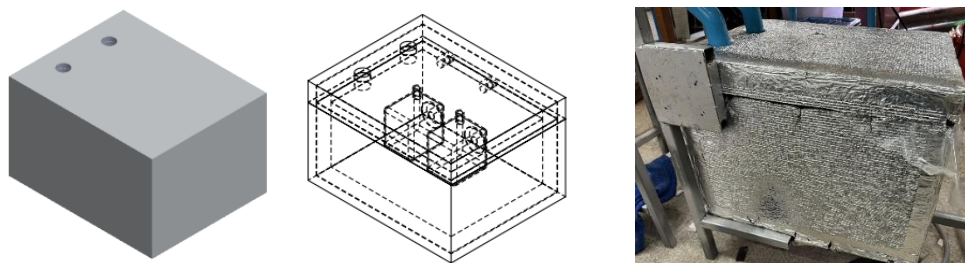
ส่วนที่ใช้ติดตั้งตัวเซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9 ส่วนติดตั้งเซ็นเซอร์

### 3.3.2.5 ถังบรรจุน้ำ (Water Tank)

ส่วนบรรจุน้ำที่ชุดทดสอบ



รูปที่ 3.10 ถังบรรจุน้ำ (Water Tank)

### 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.3.3.1 พัดลม (Fan)



รูปที่ 3.11 พัดลม (Fan)

#### 3.3.3.2 ปั๊มน้ำ AP3500

ใช้ปั๊มน้ำเพื่อให้กับผิวเปียก



รูปที่ 3.12 ปั๊มน้ำ AP3500

### 3.3.3.3 เครื่องวัดความเร็วลม testo 405i

วัดความเร็วลมขณะทดสอบ



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความเร็วลม testo 405i

### 3.3.3.4 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำ

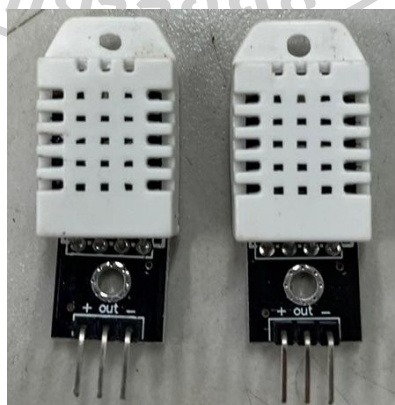
วัดอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ



รูปที่ 3.14 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำ

### 3.3.3.5 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ DHT22

ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศขณะทดสอบ



รูปที่ 3.15 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ DHT22

### 3.3.3.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266

บอร์ดสั่งการตัวเซ็นเซอร์ DHT22



รูปที่ 3.16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266

### 3.3.3.7 แท่นตั้งแผ่น

ใช้ตั้งแผ่นขณะทดสอบการไหลของน้ำบนแผ่น



รูปที่ 3.17 แท่นตั้งแผ่นทดสอบ

### 3.3.3.8 ปั้มน้ำตัวเล็ก

ปั้มน้ำตัวเล็กมีอัตราการไหล 3.5 ลิตรต่อนาที



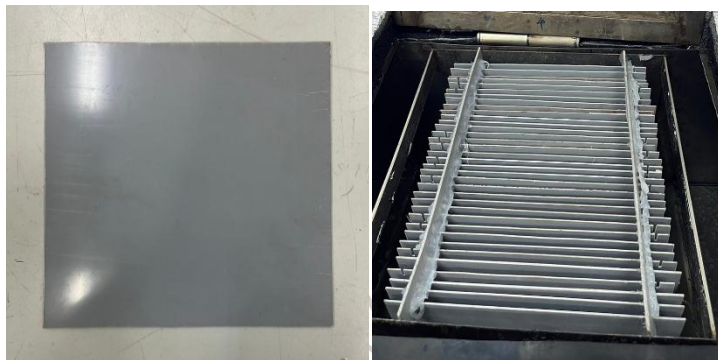
รูปที่ 3.18 ปั้มน้ำอัตราการไหล 3.5 ลิตรต่อนาที

### 3.3.4 ผีเสื้อ

ผีเสื้อที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งเป็นผีเสื้อพีวีซี และผีเสื้อเชิงการค้ำ (ผีเสื้อ Corrugate)

#### 3.3.4.1 ผีเสื้อพีวีซีเรียบ

แผ่นพีวีซี ผีเสื้อเรียบขนาด 200x200 มิลลิเมตร จำนวน 35 แผ่น



รูปที่ 3.19 แผ่นพีวีซีผีเสื้อเรียบ

#### 3.3.4.2 แผ่นพีวีซีผีเสื้อหยาบ

แผ่นพีวีซีผีเสื้อหยาบทำให้หยาบโดยการพ่นทรายไวท์อลูมิเนียมออกไซด์ ที่ขนาดเม็ดทราย WA24, WA60, WA150 และ WA220 ขนาด 200x200 มิลลิเมตร จำนวน 35 แผ่น โดยทำการพ่นทรายทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นโดยพ่นจากบนลงล่างด้านละ 5 ครั้ง



รูปที่ 3.20 แผ่นพีวีซีผีเสื้อหยาบและการพ่นทราย

### 3.3.4.3 ผิวเปียกเชิงการค้า (ผิว Corrugate)

ควบคุมปริมาตรผิวเปียกให้เท่ากับชุดทดสอบพีวีซีที่ 0.0104 ลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่จำเพาะ 460 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้มีพื้นที่ผิวทั้งหมด 4.97 ตารางเมตร



รูปที่ 3.21 ผิว Corrugate

### 3.3.5 วิธีการทดสอบ

#### 3.3.5.1 การทดสอบคุณลักษณะของผิวเรียบและผิวหยาบ

##### 3.3.5.1.1 การทดสอบความหยาบของผิว

- 1) ทดสอบความหยาบของผิวพีวีซีด้วยการหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ ) ในหน่วยไมโครเมตร ( $\mu m$ ) วัดจำนวน 5 จุดบนแผ่นพีวีซี
- 2) เลือกแผ่นพีวีซีที่มีความหยาบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 4 ค่า มาทำการทดสอบเป็นผิวเปียก

##### 3.3.5.1.2 การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของผิวเรียบและผิวหยาบ

- 1) ทดสอบจุ่มแผ่นผิวเรียบและผิวหยาบลงในน้ำสีผสมอาหาร
- 2) ดูลักษณะทางกายภาพของน้ำที่ยัดเกาะบนแผ่นเรียบและแผ่นหยาบว่ามีลักษณะอย่างไร

##### 3.3.5.1.3 การทดสอบการไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซี

- 1) นำแผ่นพีวีซีผิวเรียบจุ่มน้ำเปล่า แล้วนำมาวางบนแท่นทดสอบการไหลของน้ำ
- 2) เปิดปั้มน้ำที่อัตราการไหลต่ำ 0.1 กรัมต่อวินาที วัดความกว้างการไหลของน้ำที่ด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของแผ่น และบันทึกผลการทดลอง

|        |  |  |
|--------|--|--|
| Top    |  |  |
| Middle |  |  |
| Bottom |  |  |

รูปที่ 3.22 วัดความกว้างการไหลของน้ำด้านบนตรงกลางและด้านล่างของแผ่น

3) เปลี่ยนอัตราการไหลน้ำเป็น 0.16, 1, 2, 4.5 และ 10 กรัมต่อวินาที และบันทึกผลการทดลอง

4) ทำซ้ำข้อ 1) โดยเปลี่ยนเป็นผิวหยาบอีก 4 ค่า

5) นำความกว้างการไหลของน้ำที่ได้มาเฉลี่ย และพล็อตกราฟ

#### 3.3.5.1.4 การทดสอบความหยาบของผิวเมื่อนำมาใช้เป็นผิวเปียก

1) เตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1

2) เตรียมแผ่นพีวีซีตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.3.2

3) ทำการเปิดชุดทดสอบโดยปรับพัดลม ให้มีความเร็วลมที่ความเร็วลมสุขสบาย 0.25 เมตรต่อวินาที (ทำการวัดความเร็วอากาศโดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599)

4) เปิดปั๊มน้ำเลือกอัตราการไหลของน้ำที่ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที และเก็บผลอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จนอุณหภูมิเริ่มนิ่ง

5) เปิดเซ็นเซอร์ DHT22 เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่ทางเข้า โดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599 ห่างกันทุกครั้งชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง

6) เปิดเซ็นเซอร์ DHT22 เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ทางออก โดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599 ห่างกันทุกครั้งชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง

7) ทำซ้ำข้อ 4 – 6 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็น 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

8) ทำซ้ำข้อ 4 – 7 โดยเปลี่ยนจากแผ่นพีวีซีผิวเรียบเป็นแผ่นพีวีซีผิวหยาบอีกจำนวน 4 ค่า

#### 3.3.3.2 การทดสอบการทำความเย็นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้า

1) เตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1

2) เตรียมผิวเปียกเชิงการค้าตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.3.2

3) ทำการเปิดชุดทดสอบโดยปรับพัดลม ให้มีความเร็วลมที่ความเร็วลมสุขสบาย 0.25 เมตรต่อวินาที (ทำการวัดความเร็วอากาศโดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599)

4) เปิดปั้มน้ำเลือกอัตราการไหลของน้ำที่ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที และเก็บผลอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จนอุณหภูมิเริ่มนิ่ง

5) เปิดเซ็นเซอร์ DHT22 เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่ทางเข้า โดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599 ห่างกันทุกครึ่งชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง

6) เปิดเซ็นเซอร์ DHT22 เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ทางออก โดยใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599 ห่างกันทุกครึ่งชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง

7) ทำซ้ำข้อ 4 – 6 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็น 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

### 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ความหยาดผิว

วิเคราะห์ความหยาดผิวด้วยการหาค่าความหยาดผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ ) ในหน่วยไมโครเมตร ( $\mu m$ ) หารด้วยความยาวต่อแผ่น ( $L$ , เมตร) เพื่อให้เป็นตัวแปรไร้หน่วย

$$\frac{e}{L} \quad (3.1)$$

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพล่อตัว

เมื่อทำการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.1 และ 3.3.3.2 จะได้ค่า อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางเข้า ( $T_{db,i}$ ), อุณหภูมิกระเปาะเปียก ( $T_{wb}$ ) และอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางออก ( $T_{db,e}$ ) นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพล่อตัว ( $\mathcal{E}_{sat}$ ) จากสมการ

$$\mathcal{E}_{sat} = \left( \frac{T_{db,i} - T_{db,e}}{T_{db,i} - T_{wb}} \right) \quad (3.2)$$

นำค่าประสิทธิภาพล่อตัวที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลระหว่างประสิทธิภาพล่อตัวกับอัตราการไหลของน้ำในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที และเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพล่อตัวกับความหยาดผิวไร้หน่วย

#### 3.4.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

เมื่อทำการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.1 และ 3.3.3.2 แล้วเสร็จ และคำนวณหาประสิทธิภาพล่อตัวตามหัวข้อที่ 3.4.2 นำประสิทธิภาพล่อตัวที่ได้มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจาก

$$Q = h_c A_s \Delta T_{LM} = \dot{m}_a c_{p,u} (T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนจะเท่ากับอัตรา  
การถ่ายเทความร้อนจากความร้อนสัมผัส

และ

$$\Delta T_{LM} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \left( \frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \right)} \quad (3.4)$$

นำสมการที่ 3.4 แทนค่าลงในสมการที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q &= h_c A_s \frac{T_2 - T_1}{\ln \left( \frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \right)} \\ -h_c A_s (T_1 - T_2) &= Q \ln \left( \frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \right) \\ \frac{-h_c A_s (T_1 - T_2)}{Q} &= \ln \left( \frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \right) \\ e^{\left[ \frac{-h_c A_s (T_1 - T_2)}{Q} \right]} &= \frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \\ &= \frac{T_1 - T_1 + T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \\ &= \frac{T_1 - T_{wb}}{(T_1 - T_{wb}) - (T_1 - T_2)} \\ &= \frac{T_1 - T_{wb}}{\left( \frac{T_1 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}} \right) - \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \right)} \\ e^{\left[ \frac{-h_c A_s (T_1 - T_2)}{Q} \right]} &= 1 - \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 จะเห็นว่าในเทอม  $\frac{(T_1 - T_2)}{Q}$  เขียนในรูปอัตราการถ่ายเทความร้อนสัมผัสคือ  $\dot{m}_a c_{p,u}$  และจากสมการที่ 3.2 ในเทอม  $\left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \right)$  คือ  $\mathcal{E}_{sat}$  เพราะฉะนั้นจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$e^{\left( -\frac{h_c A}{\dot{m}_a c_{p,u}} \right)} = 1 - \mathcal{E}_{sat} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 จัดรูปให้อยู่ในรูปประสิทธิผลในตัวได้เป็น

$$\mathcal{E}_{sat} = 1 - e^{\left( -\frac{h_c A}{\dot{m}_a c_{p,u}} \right)} \quad (3.7)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ

$$h_c = -\frac{\ln(1 - \mathcal{E}_{sat}) \dot{m}_a c_{p,u}}{A_s} \quad (3.8)$$

นำสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบผลระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับอัตราการไหลของน้ำ และเปรียบเทียบผลระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับความหนาผิวไร้นวล



## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

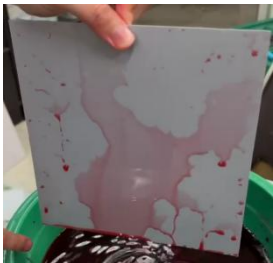
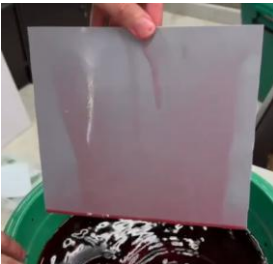
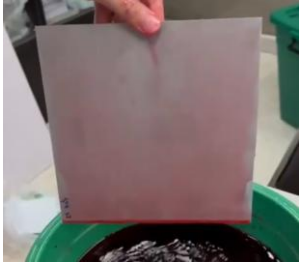
จากการทดลอง เพื่อศึกษาวัสดุทดแทนแผ่นผิวเปียกเชิงการค้า (Corrugate) ด้วยวัสดุพีวีซี ในระบบทำความเย็นแบบระเหย คุณลักษณะทางกายภาพของผิวเรียบและผิวหยาบ การทดสอบการไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ ค่าประสิทธิผลอิมัลชันและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพีวีซีแต่ละความหยาบผิว ได้แก่ ผิวหยาบที่พันทรายไวท์อลูมิเนียมออกไซด์ ที่มีค่าความหยาบในเทอมไร้หน่วยเป็นค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่นผิวเปียก  $(e/L) \times 10^{-5}$  คือ 0.884, 1.97, 2.17 และ 3.07 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 30 - 35 องศาเซลเซียส, ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้า 60 - 70% และอัตราการไหลของน้ำ 0.2 - 0.6 ลิตรต่อวินาที

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

##### 4.1.1 ค่าความหยาบผิว

พลาสติกพีวีซีแผ่นเรียบขนาด 200 x 200 มิลลิเมตร พันด้วยทรายไวท์อลูมิเนียมออกไซด์เบอร์ W24, W60, W150 และ W220 ทำให้เกิดความหยาบผิว และทำการวัดความหยาบแบบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขคณิต ( $R_a$ ) คือ 1.77, 3.94, 4.35 และ 6.15 ไมโครเมตร หรือค่าความหยาบในเทอมไร้หน่วยเป็นค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่นผิวเปียก  $(e/L) \times 10^{-5}$  คือ 0.884, 1.97, 2.17 และ 3.07

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการยิดเกาะทางกายภาพของน้ำบนแผ่นพีวีซี

| รูปลักษณะของน้ำที่ยิดเกาะแผ่นพีวีซี                                                 | วิเคราะห์ลักษณะการยิดเกาะ                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p><b>แผ่นเรียบ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจะไม่ยิดเกาะบนแผ่นผิวเรียบ จะไหลลงอย่างรวดเร็ว</li> <li>- บางส่วนที่ยิดเกาะก็จะยิดเกาะเป็นก้อนไม่ยิดเกาะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ</li> </ul>                                                                                                                     |
|    | <p><b>แผ่นผิวหยาบ 0.884</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจะยิดเกาะบนพื้นผิว แต่ยังคงไหลลงอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากความเว้าของร่องน้ำทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของแผ่น</li> <li>- ลักษณะการยิดเกาะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ</li> </ul>                                                                                 |
|   | <p><b>แผ่นผิวหยาบ 1.97</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจะยิดเกาะบนพื้นผิว และไหลลงช้ากว่าแผ่นผิวหยาบขนาด 1.77 ไมโครเมตร สังเกตได้จากร่องน้ำทั้งด้านซ้ายและด้านขวาจะเล็กกว่า</li> <li>- ลักษณะการยิดเกาะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ</li> </ul>                                                                      |
|  | <p><b>แผ่นผิวหยาบ 2.17</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจะยิดเกาะบนพื้นผิว และไหลลงช้ากว่าแผ่นผิวหยาบขนาด 3.94 ไมโครเมตร สังเกตได้จากไม่มีการเว้าของร่องน้ำทั้งด้านซ้ายและด้านขวา</li> <li>- ลักษณะการยิดเกาะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ</li> </ul>                                                                 |
|  | <p><b>แผ่นผิวหยาบ 3.07</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจะยิดเกาะบนพื้นผิว และยิดเกาะได้ดีที่สุด สังเกตได้จากไม่มีการเว้าของร่องน้ำทั้งด้านซ้ายและด้านขวา</li> <li>- ลักษณะการยิดเกาะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ แต่หนากว่าทั้งแผ่นผิวหยาบขนาด 1.77, 3.94 และ 4.35 ไมโครเมตร สังเกตได้จากสีที่เข้มที่สุด</li> </ul> |

#### 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

ทดสอบลักษณะทางกายภาพของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบโดยทดสอบลักษณะการยึดเกาะของน้ำบนแผ่นผิวพีวีซีทั้งแผ่นดังตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าการยึดเกาะของน้ำในแผ่นผิวเรียบ น้ำจะไม่สามารถยึดเกาะบนแผ่นผิวได้เลย แต่กับผิวหยาบ น้ำจะยึดเกาะได้ดีกว่า และยึดเกาะได้ดีขึ้นเมื่อความหยาบผิวเพิ่มขึ้น และยึดเกาะได้ดีที่สุดที่ความหยาบผิว 6.15 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.20 ในบทที่ 2 จะเห็นว่าแผ่นผิวที่มีความหยาบจะมีการกระจายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ และการยึดเกาะของน้ำดีกว่าแผ่นผิวเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับ C.-C. Hsieh et. al. [36] ซึ่งพบว่าพื้นผิวที่มีความหยาบหรือโครงสร้างไมโครจะช่วยให้ น้ำกระจายเป็นฟิล์มบางๆเคลือบบนพื้นผิวได้ดีกว่าผิวเรียบ

#### 4.1.3 การไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

ทดสอบการไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ 0.884, 1.97, 2.17 และ 3.07 ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการไหลของน้ำทางกายภาพ ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1, 0.16, 1, 2, 4.5 และ 10 กรัมต่อวินาที จะเห็นได้ว่าที่แผ่นพีวีซีผิวเรียบจะไม่มี การยึดเกาะผิวและจะไหลเป็นเส้นตรง แต่กับแผ่นพีวีซีผิวหยาบน้ำจะมีการกระจายและยึดเกาะผิวได้ดีกว่า [36, 75-77] และจะดีขึ้นเมื่อมีความหยาบเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่าผิวหยาบมีปัจจัยความเสียดทาน (friction factor) สูงกว่าแผ่นพีวีซีผิวเรียบ ดังเช่น Yadav et. al. และ Croce et. al. [77, 78] ที่พบว่าเมื่อผิวหยาบเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปัจจัยความเสียดทานเพิ่มขึ้น



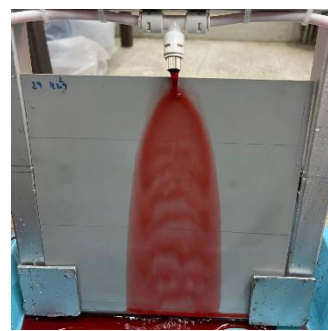
ก. การไหลของน้ำบนแผ่นเรียบ



ข. การไหลของน้ำบนแผ่นผิวหยาบ 0.884



ค. การไหลของน้ำบนแผ่นผิวหยาบ 1.97



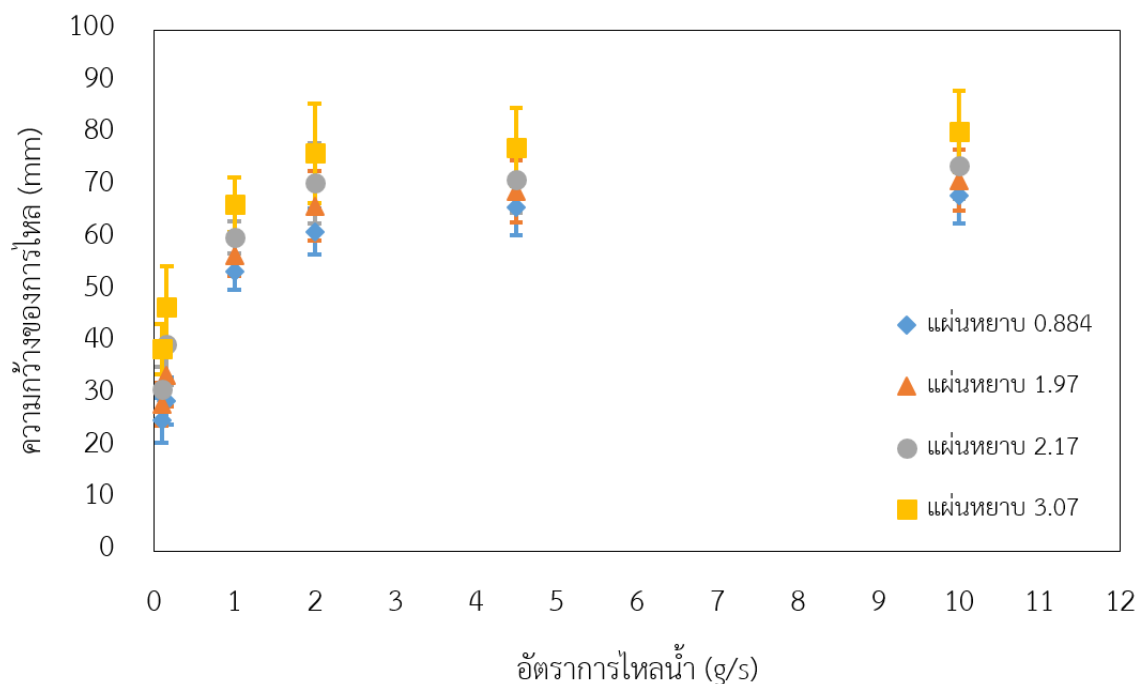
ง. การไหลของน้ำบนแผ่นผิวหยาบ 2.17



จ. การไหลของน้ำบนแผ่นผิวหยาบ 3.07

รูปที่ 4.1 การไหลของน้ำบนแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

จากรูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำในหน่วยกรัมต่อวินาทีกับความกว้างการไหลของน้ำในหน่วยมิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่อัตราการไหลน้ำ 0.1, 0.16, 1 และ 2 กรัมต่อวินาที เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เห็นได้จากที่ผิวหยาบ 0.884 มีความกว้างการไหลของน้ำเฉลี่ยที่ 25.28, 28.95, 53.76 และ 61.46 มิลลิเมตรตามลำดับ และมีความกว้างการไหลของน้ำมากที่สุดที่ผิวหยาบ 3.07 โดยมีความกว้างเฉลี่ยอยู่ที่ 38.97, 46.93, 66.62 และ 76.47 มิลลิเมตรตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น และกล่าวได้ว่าเมื่อความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างการไหลของน้ำสูงขึ้นหรือมีการกระจายน้ำดียิ่งขึ้นนั่นเอง หรืออีกนัยหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยความเสียดทาน (friction factor) จะพบว่าเมื่อผิวหยาบเพิ่มขึ้นจะมีปัจจัยความเสียดทานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Yadav et. al. และ Croce et. al. [77, 78] ที่พบว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สสูงขึ้นส่งผลให้ปัจจัยความเสียดทานสูงขึ้น และจะสูงขึ้นตามผิวหยาบที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

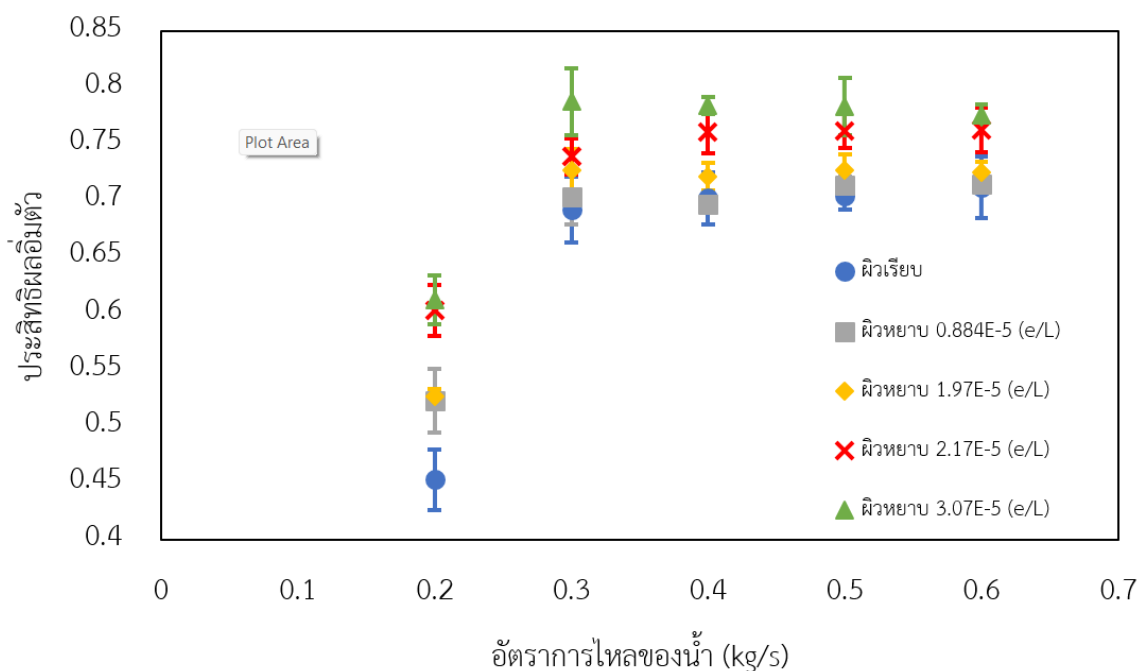


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับความกว้างการไหลของน้ำ

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาถึงอัตราการไหลในช่วงตั้งแต่ 2, 4.5 และ 10 กรัมต่อวินาที ที่ผิวหยาบ 0.884 ที่มีความกว้างการไหลของน้ำเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 61.46, 66.19 และ 68.35 มิลลิเมตรตามลำดับ และมีความกว้างการไหลของน้ำสูงสุดที่ผิวหยาบ 3.07 ที่ 76.47, 77.66 และ 80.68 มิลลิเมตรตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลในช่วงนี้จะทำให้ความกว้างการไหลของน้ำจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงถึงจุดหนึ่งแล้วการกระจายน้ำจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออีกนัยหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบเป็นปัจจัยความเสียดทาน (friction factor) เมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้น ปัจจัยความเสียดทานจะลดลง แต่เมื่อพิจารณาถึงความหยาบของผิวยังเห็นได้ว่าเมื่อความหยาบของผิวสูงขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ปัจจัยความเสียดทาน (friction factor) จะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Yadav et. al. และ Croce et. al. [77, 78] ที่พบว่าเมื่อเรย์โนลด์สเบอร์สูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะทำให้ปัจจัยความเสียดทานลดลง และจะสูงขึ้นตามความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้น

## 4.2 คุณลักษณะการทำความเย็นของแผ่นพีวีซีเมื่อใช้งานเป็นผิวเปียก

4.2.1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ที่มีต่อประสิทธิภาพลมตัวของผิวเปียกของแผ่นพีวีซี ที่ความเร็วสุบสายของอากาศ 0.25 เมตรต่อวินาที

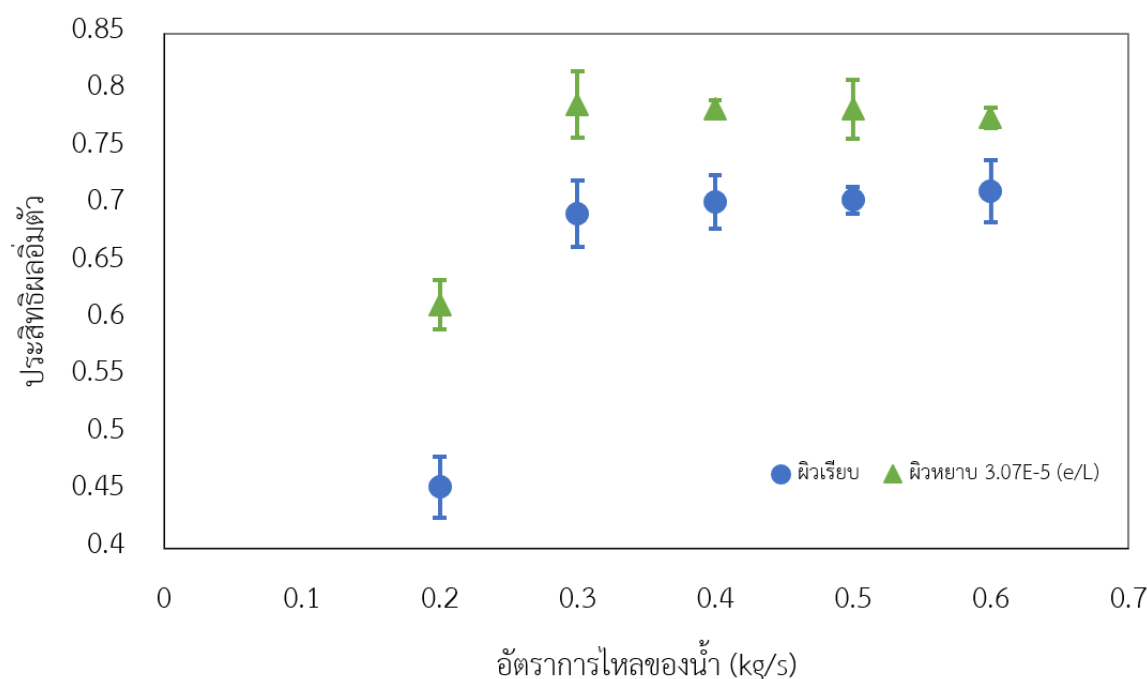


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการไหลของน้ำกับประสิทธิผลอิมมัตวของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับประสิทธิผลอิมมัตวของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ (ประสิทธิผลอิมมัตวจะหาได้จากสมการที่ 3.2) จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำต่ำคือ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที เป็นช่วงที่ผิวเปียกยังไม่อิมมัตวด้วยน้ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 จะเป็นช่วงที่อัตราการไหลของน้ำต่ำเทียบเท่า 0.16 กรัมต่อวินาที ในรูปที่ 4.2 ซึ่งความกว้างการกระจายของน้ำอยู่ที่ 28.95 – 46.93 มิลลิเมตร มีผลทำให้ประสิทธิผลอิมมัตวในช่วงนี้มีค่าต่ำว่าช่วง 0.3 – 0.6 กิโลกรัม ในทางตรงกันข้ามในช่วงอัตราการไหลน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะเป็นช่วงที่ผิวเปียกอิมมัตวด้วยน้ำซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 จะเป็นช่วงอัตราการไหลในช่วง 1 – 10 กรัมต่อวินาที ซึ่งมีความกว้างการกระจายน้ำอยู่ที่ 53.76 – 80.68 มิลลิเมตร มีผลทำให้ประสิทธิผลอิมมัตวมีค่าสูงกว่าช่วง 0.2 กิโลกรัมอย่างมาก

จากรูปที่ 4.3 ยังสรุปได้อีกว่า เมื่อผิวเปียกพีวีซีมีค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิผลอิมมัตวมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากพีวีซีที่มีความหยาบผิว 3.07 จะมีประสิทธิผลอิมมัตวสูงสุดอยู่ที่ 0.79 ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับพีวีซีผิวหยาบที่ 0.884, 1.97 และ 2.17 จะมีประสิทธิผลอิมมัตวอยู่ที่ 0.7, 0.73 และ 0.74 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาทีเช่นเดียวกัน ซึ่งพีวีซีผิวหยาบ 3.07 จะให้ประสิทธิผลอิมมัตวมากกว่าพีวีซีที่มีความหยาบ 0.884, 1.97 และ 2.17 ถึง 9%, 6% และ 5% ตามลำดับ และเมื่อนำผิวพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุด

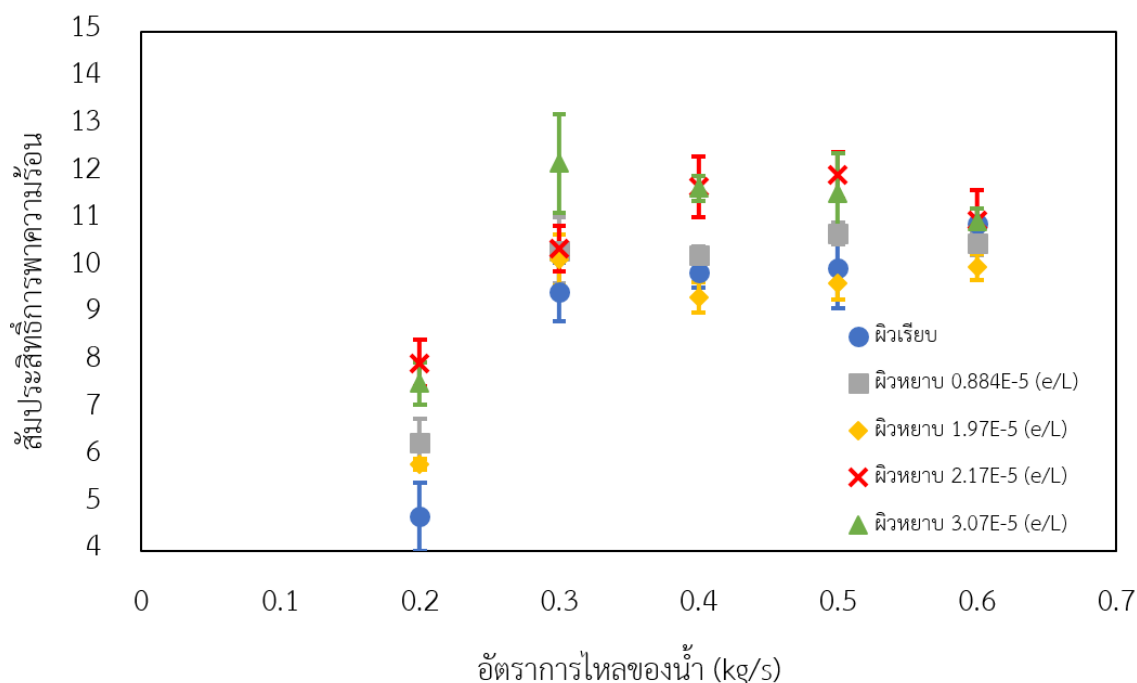
มาเปรียบเทียบกับแผ่นพีวีซีผิวเรียบดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับประสิทธิผลอิมตัวของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าแผ่นพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุดจะให้ประสิทธิผลอิมตัวแตกต่างจากผิวเรียบถึง 10% และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิผลอิมตัวของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเราพิจารณาถึงช่วงที่ผิวเปียกอิมตัวด้วยน้ำในช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะเห็นได้ว่าประสิทธิผลอิมตัวในช่วงนี้ของแต่ละความหยาบผิวจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับ S. He [30, 66], T. Gunhan [40], M. Yan [63] และ H.O. Korese JK [67] ซึ่งได้อธิบายไว้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลต่อประสิทธิผลอิมตัวน้อยมาก เมื่อผิวเปียกมีน้ำเคลือบผิวสัมผัสอย่างเพียงพอ

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นพีวีซี ที่ความเร็วสุบชายของอากาศ 0.25 เมตรต่อวินาที

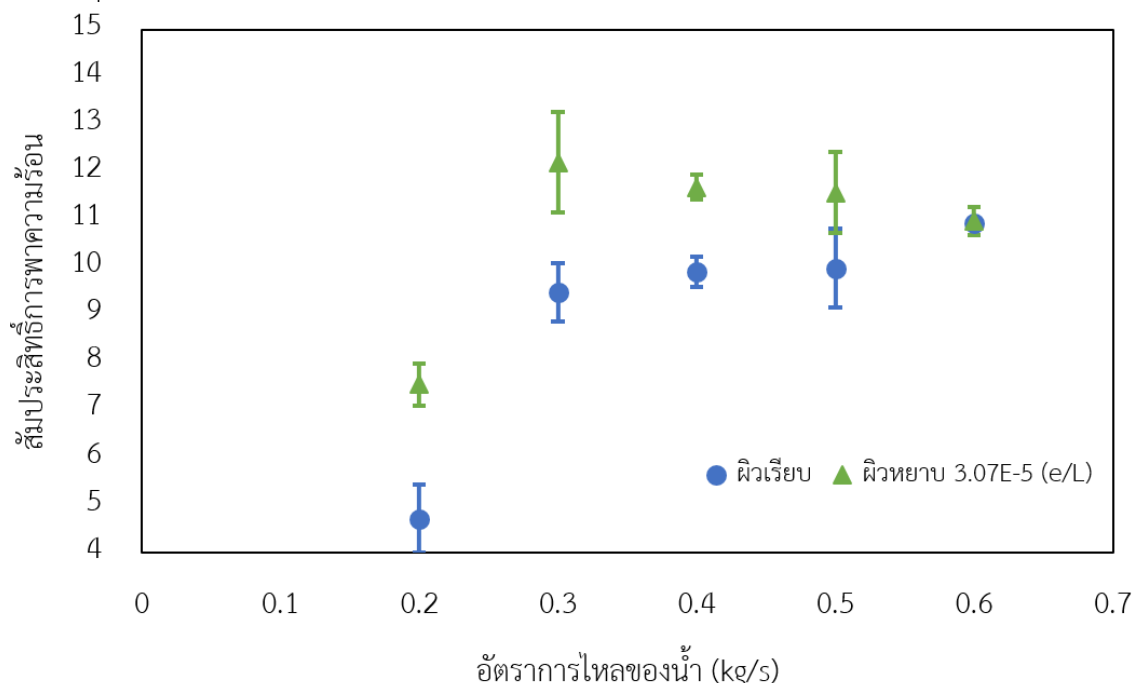


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียสของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ (สัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากสมการ 3.8) จะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในตัวในรูปที่ 4.3 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับอัตราการไหลของน้ำ ในรูปที่ 4.5 จะมีรูปร่างและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อผิวเปียกพีวีซีอิมมิดด้วยน้ำ จะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นกว่าช่วงที่ไม่อิมมิดด้วยน้ำเป็นอย่างมาก

เมื่อผิวเปียกพีวีซีมีค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากพีวีซีที่ความหยาบผิว 3.07 จะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 12.21 วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับพีวีซีผิวหยาบ 0.884, 1.97 และ 2.17 จะสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ที่ 10.36, 10.16 และ 11.25 วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาทีเช่นเดียวกัน ซึ่งพีวีซีผิวหยาบ 3.07 จะให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่าพีวีซีที่มีความหยาบ 0.884, 1.97 และ 2.17 อยู่ 1.85, 2.05 และ 0.96 วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ M.R.Pais et. al. [37] ซึ่งทำการทดลองสเปรย์น้ำและอากาศลงบนพื้นผิวที่มีความหยาบแตกต่างกัน

พบว่า อัตราฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามความขรุขระของผิวที่เพิ่มอีกด้วย

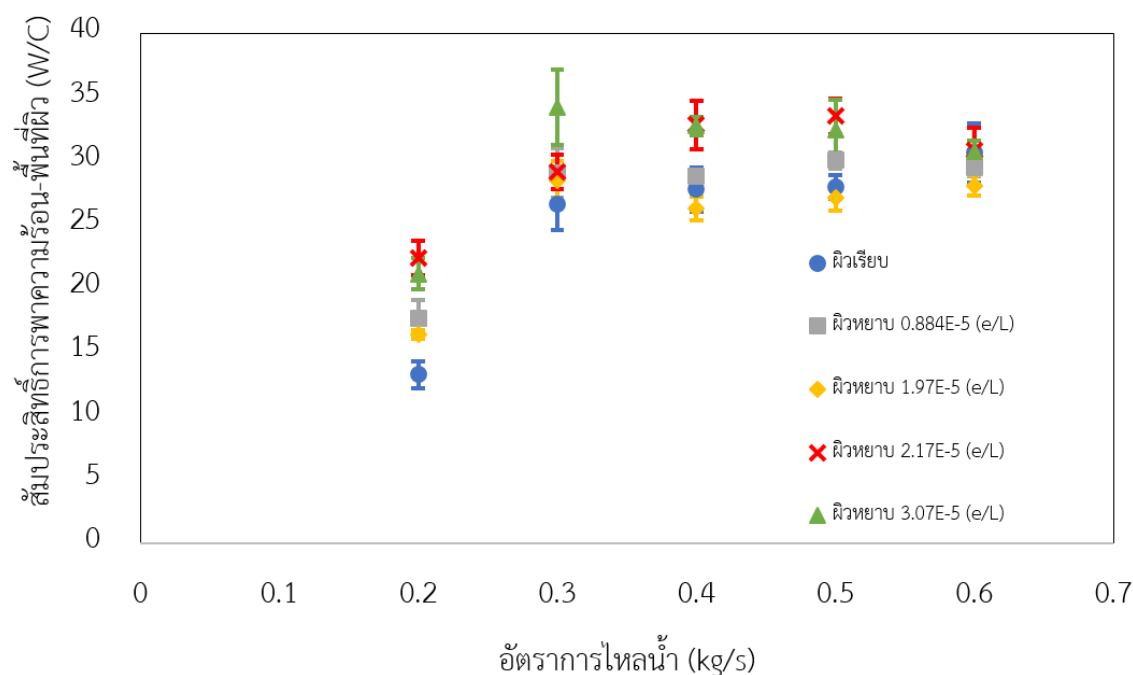


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่ดีที่สุด

เมื่อนำผิวพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับแผ่นพีวีซีผิวเรียบดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าแผ่นพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุดจะให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าแผ่นพีวีซีผิวเรียบ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ C.-C. Hsieh et. al. [36] ที่ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อวัสดุมีความหยาบผิวจะทำให้เพิ่มอัตราการระเหยน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกนัยหนึ่งคือจะทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอีกด้วย

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเราพิจารณาถึงช่วงที่ผิวเปียกอิ่มตัวด้วยน้ำในช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงนี้ของแต่ละความหยาบผิวจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนน้อยมาก เมื่อผิวเปียกมีน้ำเคลือบผิวสัมผัสอย่างเพียงพอแล้ว

4.2.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัส ( $h_c A_s$ ) (W/C) ของแผ่นพีวีซี ที่ความเร็วสุบบายของอากาศ 0.25 เมตรต่อวินาที

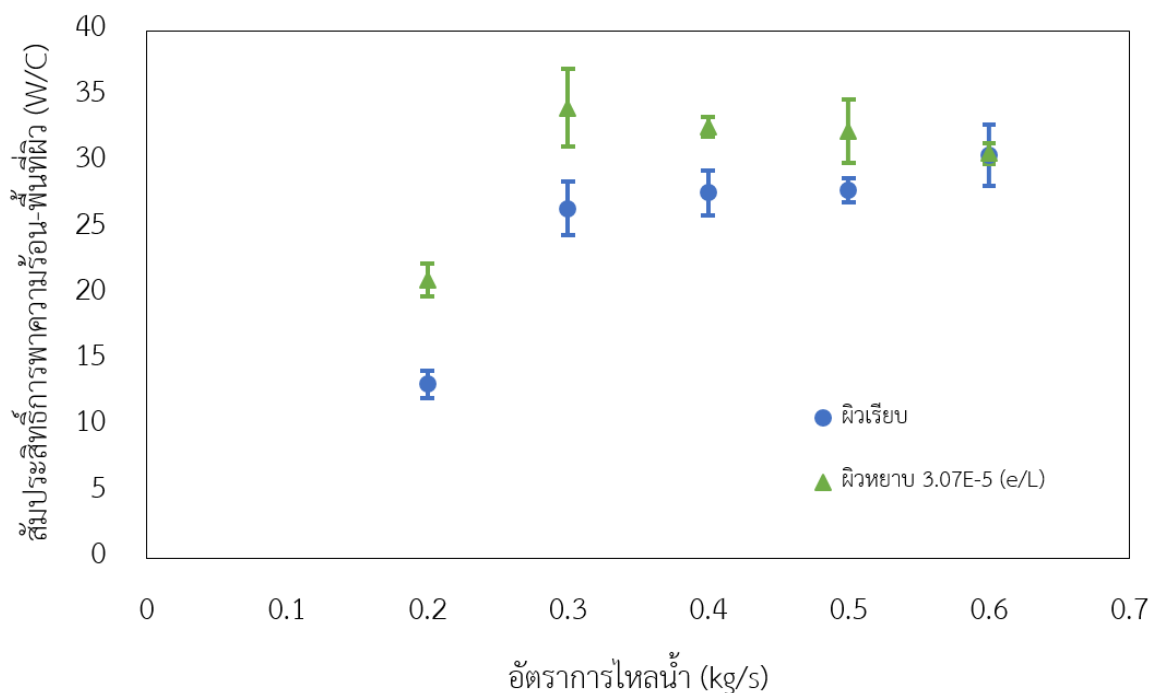


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสของแผ่นพีวีซี

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการไหลของน้ำในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัส ( $h_c A_s$ ) ในหน่วยวัตต์ต่อองศาเซลเซียส (W/C) ของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ จะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปที่ 4.5 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสในรูปที่ 4.7 จะมีรูปร่างและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของแต่ละผิวทดสอบมีค่าเท่ากันหรือเป็นตัวแปรควบคุมนั่นเอง กล่าวคือเมื่อผิวเปียกพีวีซีอิมมิดด้วยน้ำ จะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัส ( $h_c A_s$ ) มีค่าสูงขึ้นกว่าช่วงที่ไม่อิมมิดด้วยน้ำเป็นอย่างมาก

เมื่อผิวเปียกพีวีซีมีค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากพีวีซีที่มีความหยาบผิว 3.07 จะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสสูงสุดอยู่ที่ 34.19 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ในขณะที่ผิวเรียบเมื่อเทียบกับพีวีซีผิวหยาบ 0.884, 1.97 และ 2.17 จะสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสอยู่ที่ 29.02, 28.46 และ 29.13 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของ

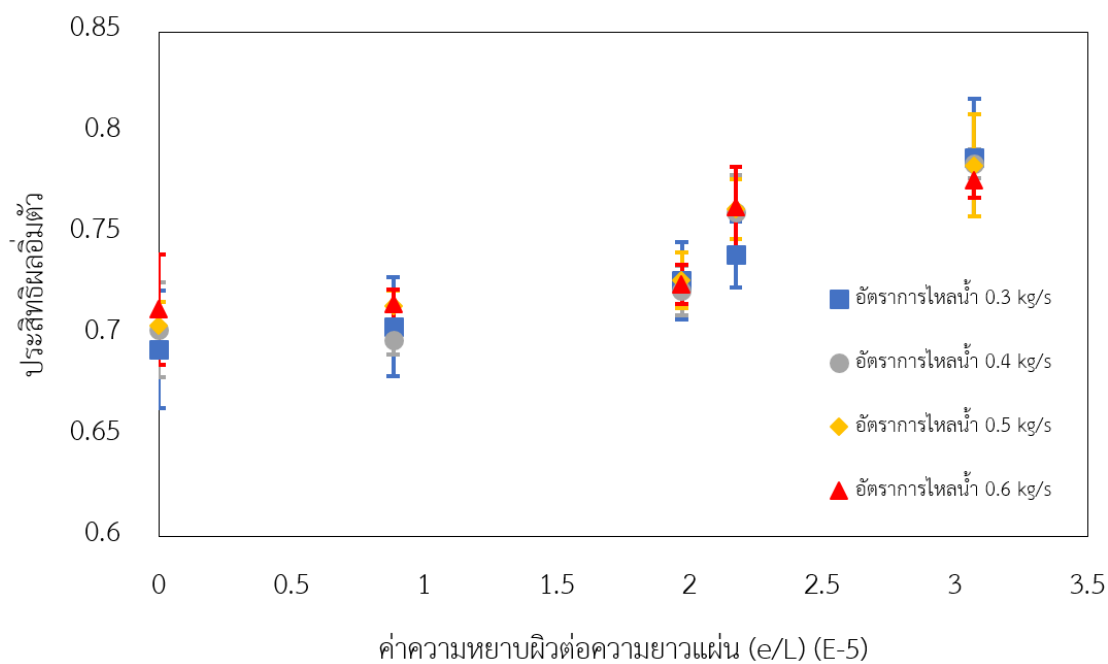
น้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาทีเช่นเดียวกัน ซึ่งพีวีซีผิวหยาบ 3.07 จะให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสมากกว่าพีวีซีที่มีความหยาบ 0.884, 1.97 และ 2.17 อยู่ 5.17, 5.73 และ 5.06 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ



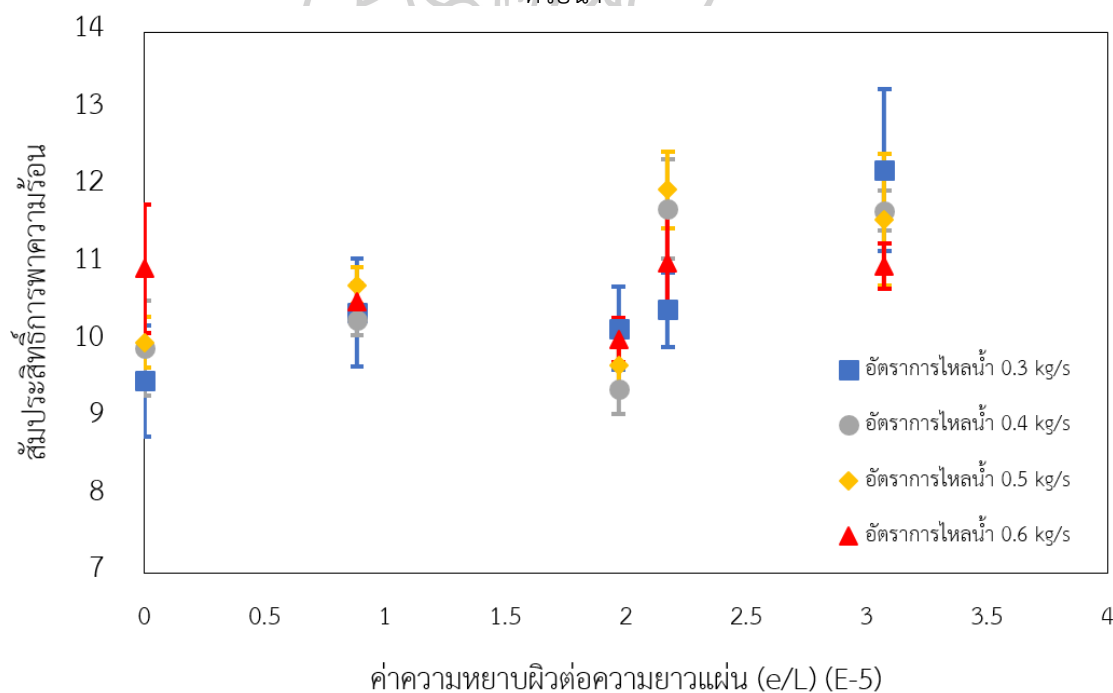
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด

เมื่อนำผิวพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับแผ่นพีวีซีผิวเรียบดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัส ( ) ในหน่วยวัตต์ต่อองศาเซลเซียส (W/C) ของแผ่นพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าแผ่นพีวีซีผิวหยาบที่ดีที่สุดจะให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสสูงกว่าแผ่นพีวีซีผิวเรียบ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

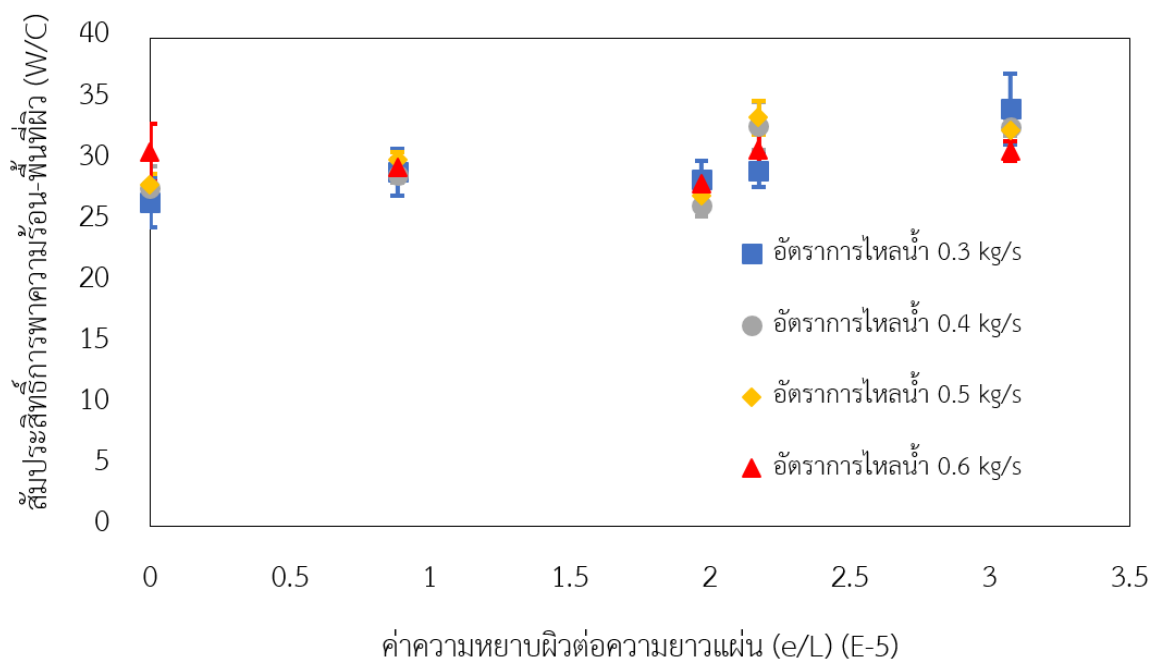
4.2.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวพีวีซีที่มีต่อประสิทธิภาพการพาความร้อนในช่วงผิวสัมผัสด้วยน้ำ ที่ความเร็วอากาศสุญญากาศ 0.25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาพิวของพีวีซีต่อประสิทธิผลลิ่มตัวในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำ

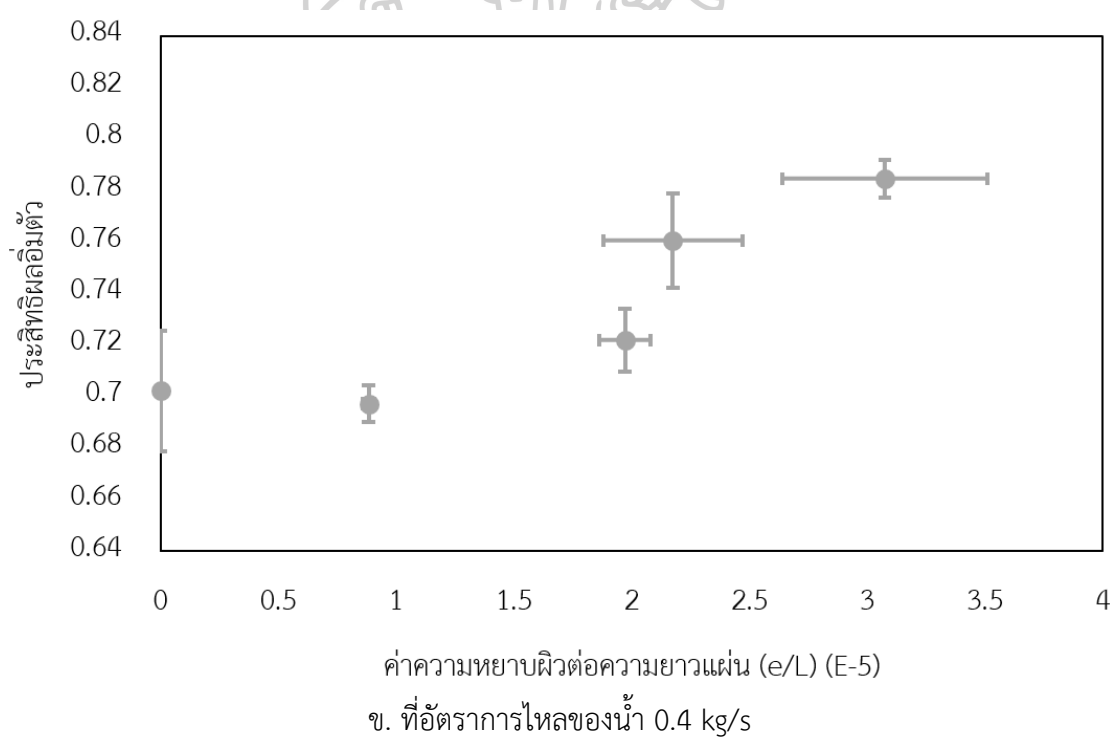
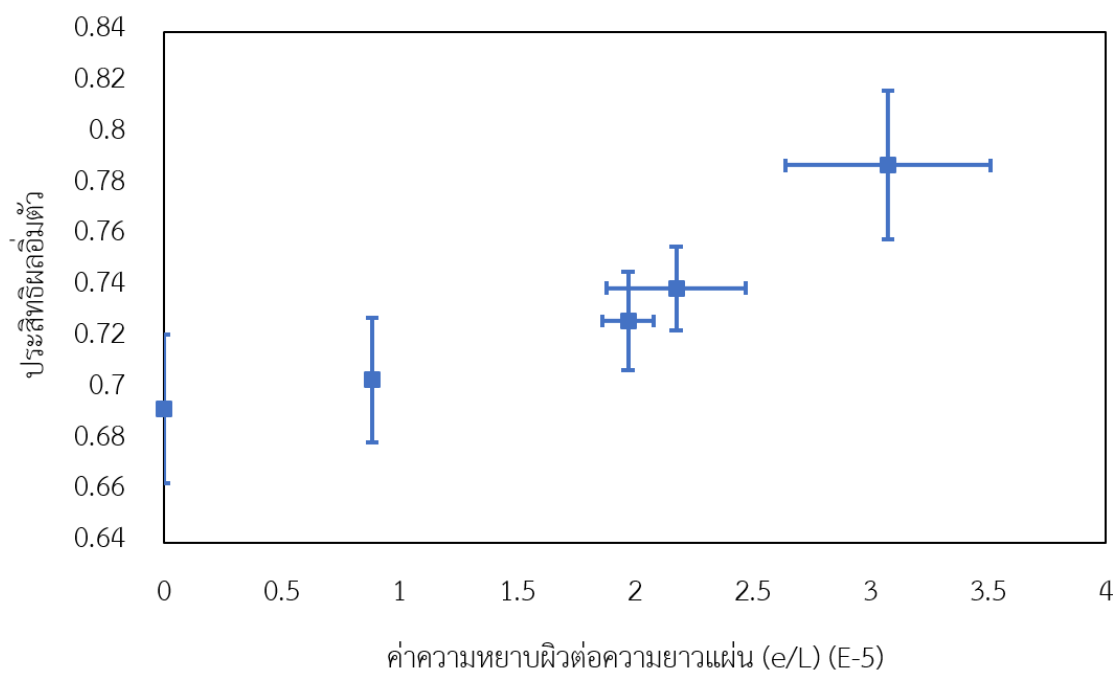


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาพิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำ

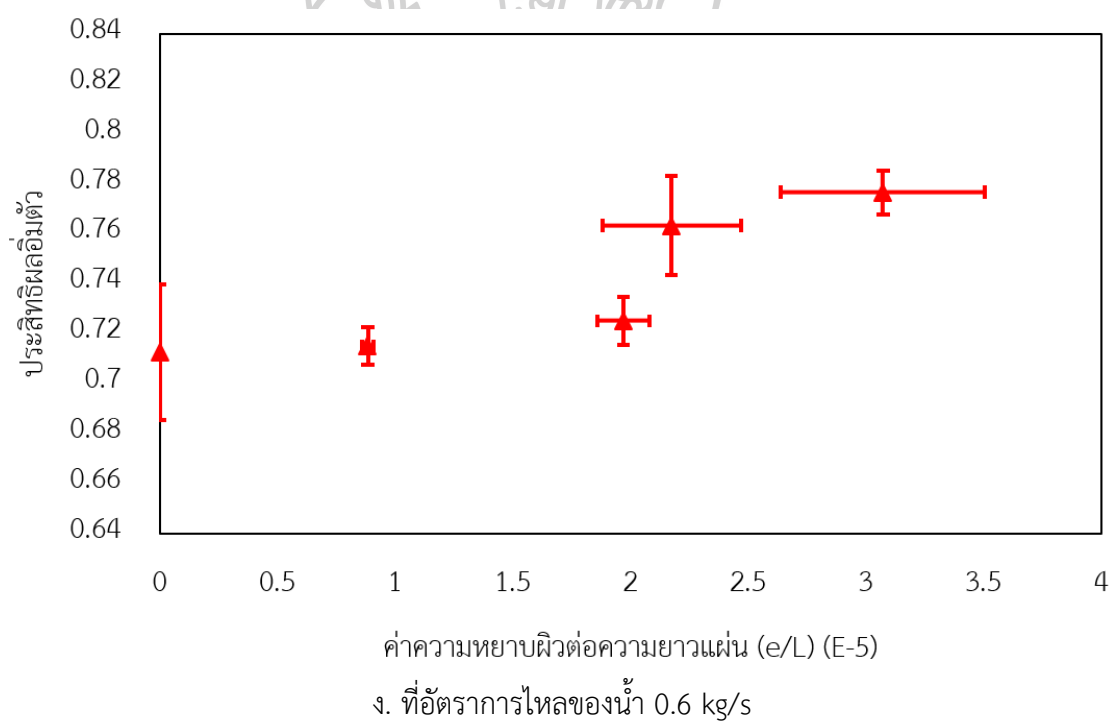
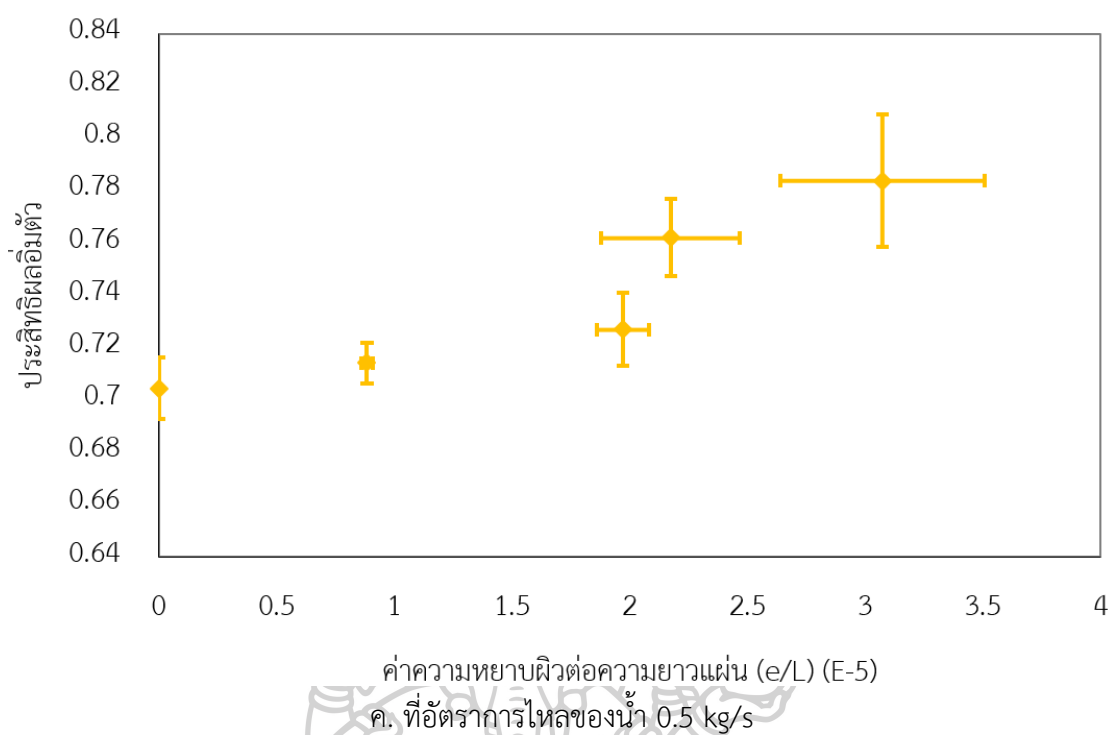


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสในช่วงที่ผิวอิมมิดด้วยน้ำ

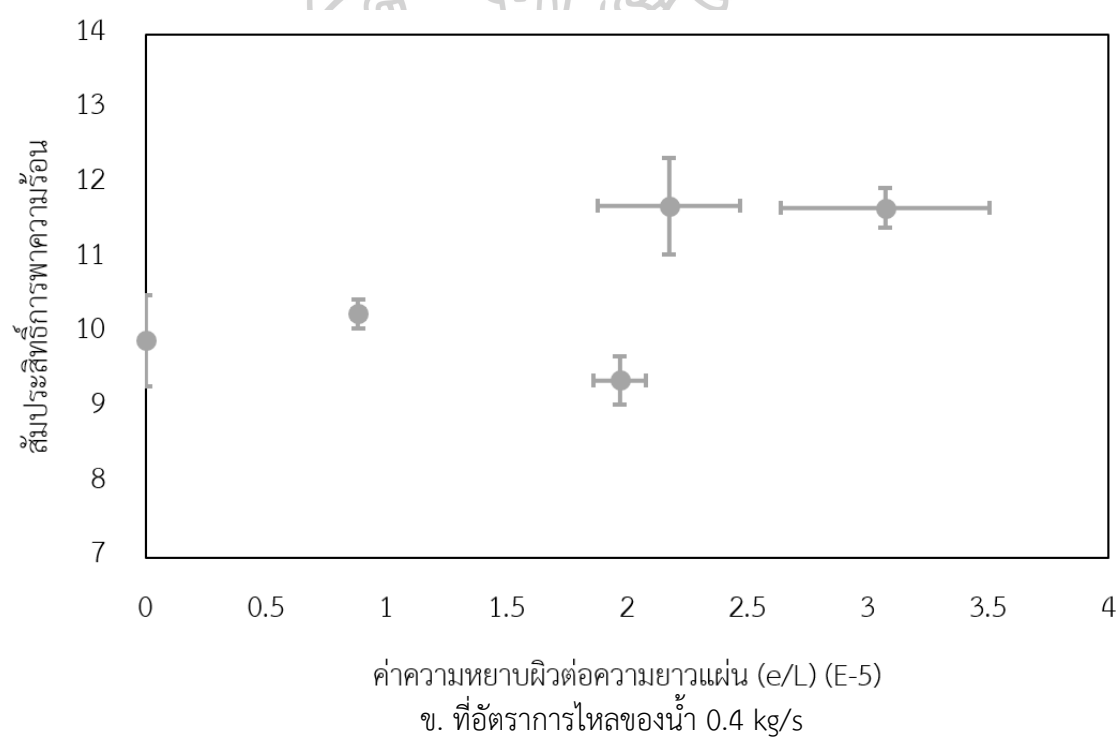
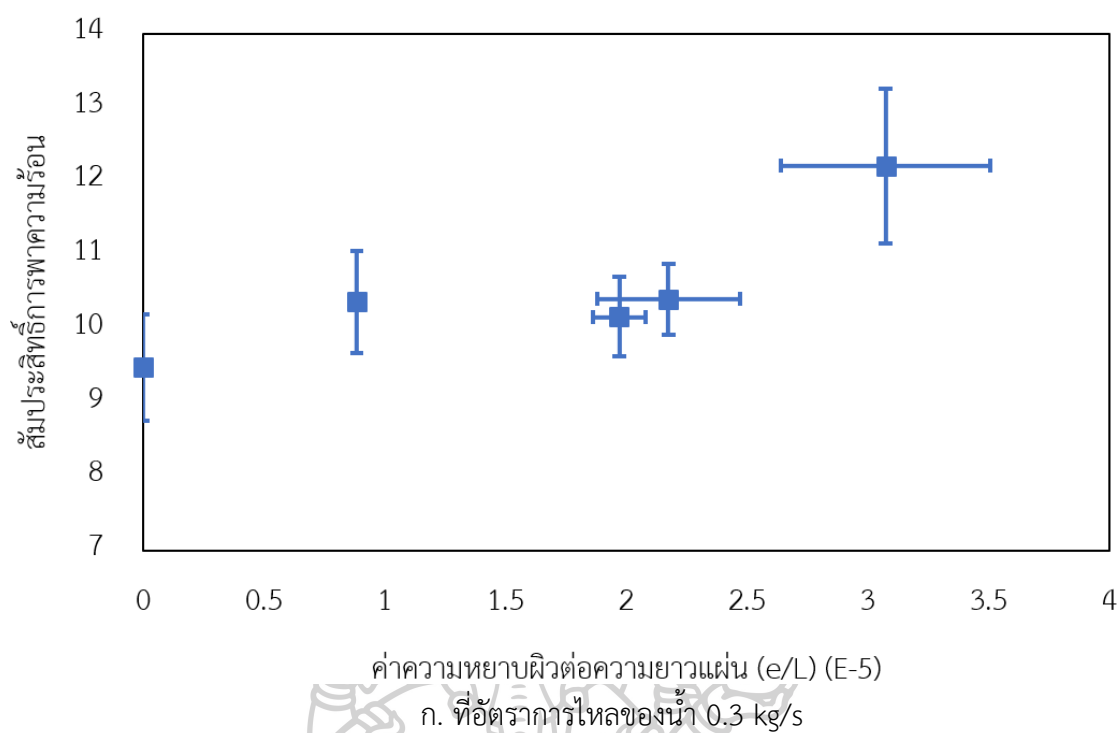
จากรูปที่ 4.9 ,4.10 และ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีในเทอมไร่หน่วยค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่น ( $e/L \times 10^{-5}$ ) กับประสิทธิภาพผลอิมมิด, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสในหน่วยวัตต์ต่อองศาเซลเซียสในช่วงที่ผิวอิมมิดด้วยน้ำ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพผลอิมมิดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่อัตราการไหลของน้ำในช่วง 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพผลอิมมิดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสรุปได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.1 คือ การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลต่อประสิทธิภาพผลอิมมิดน้อยมาก เมื่อผิวเปียกมีน้ำเคลือบผิวสัมผัสอย่างเพียงพอ



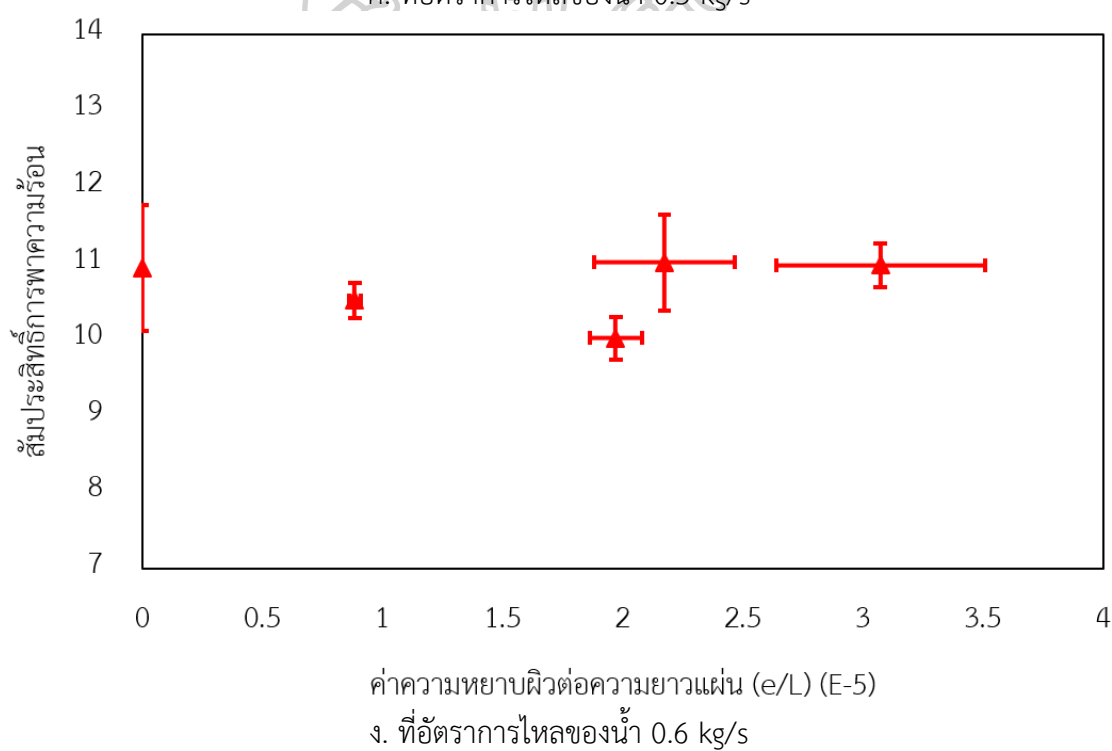
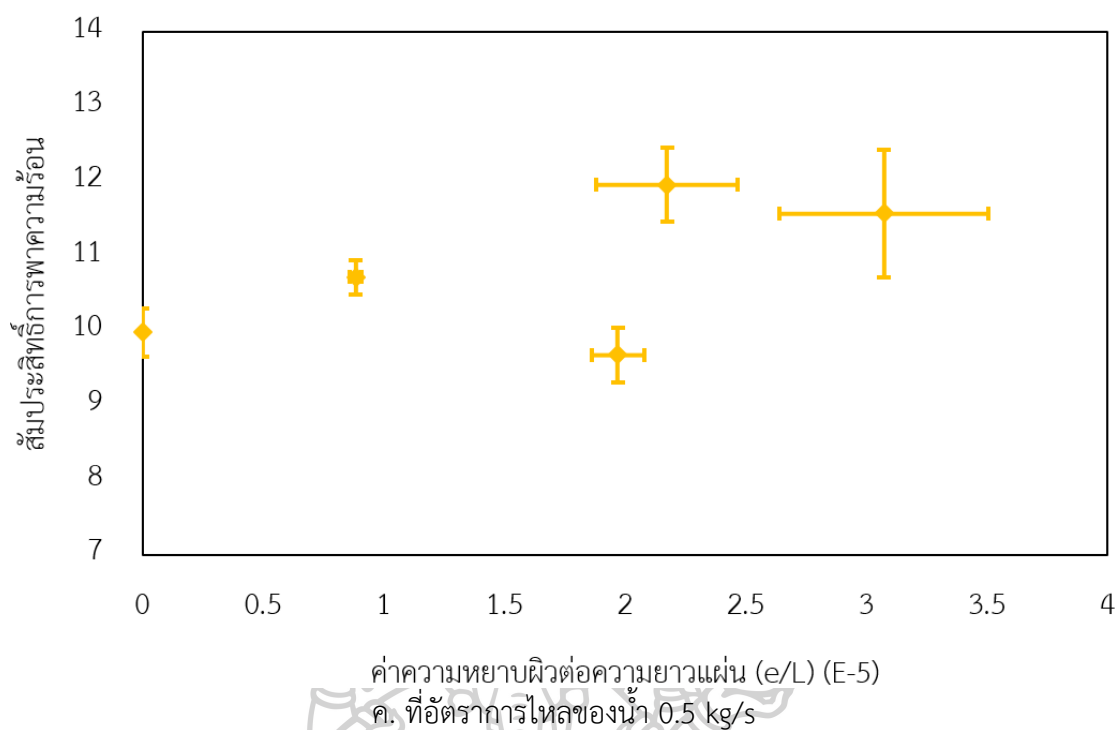
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อประสิทธิภาพลื่นตัวในช่วงที่ผิว  
อิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s



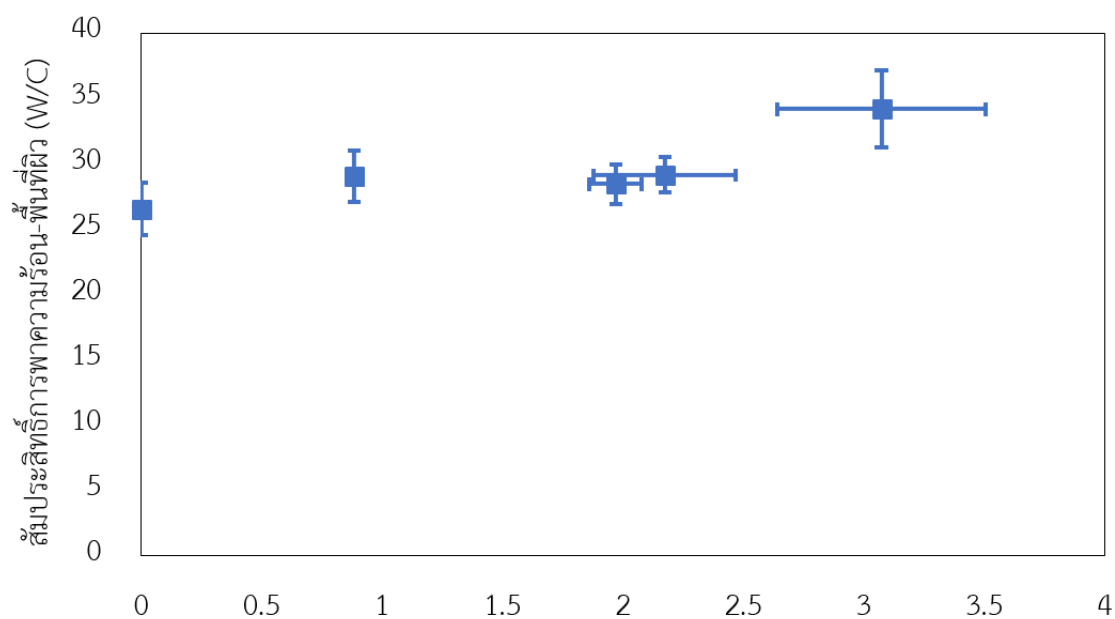
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นผิวของพีวีซีต่อประสิทธิภาพลิ้นตัวในช่วงที่ผิว  
อิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s (ต่อ)



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ในช่วงที่ผิวอิมตัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s

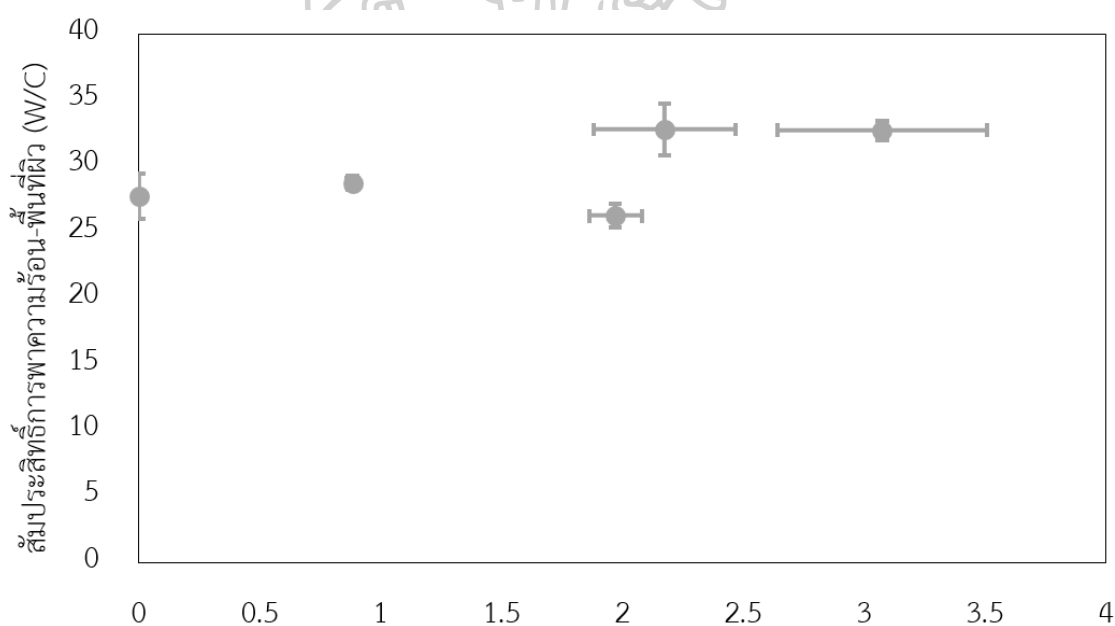


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ในช่วงที่ผิวอิมมิดด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s (ต่อ)



ค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่น (e/L) (E-5)

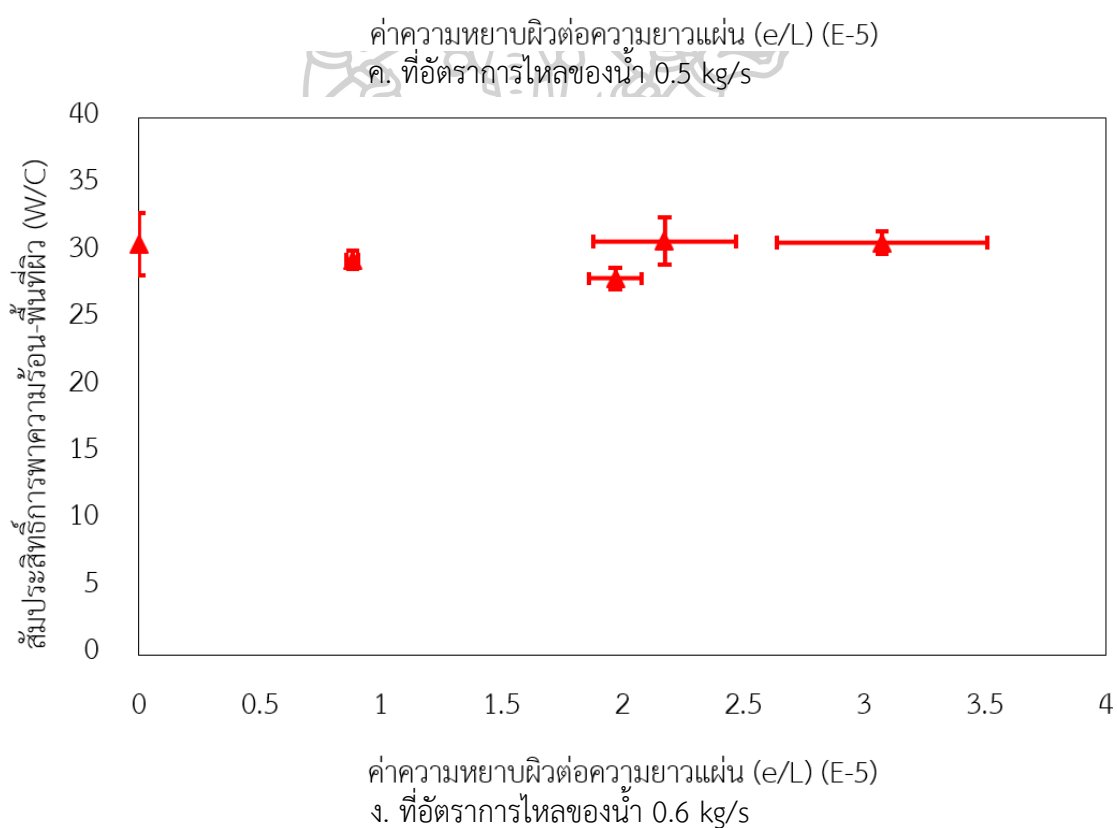
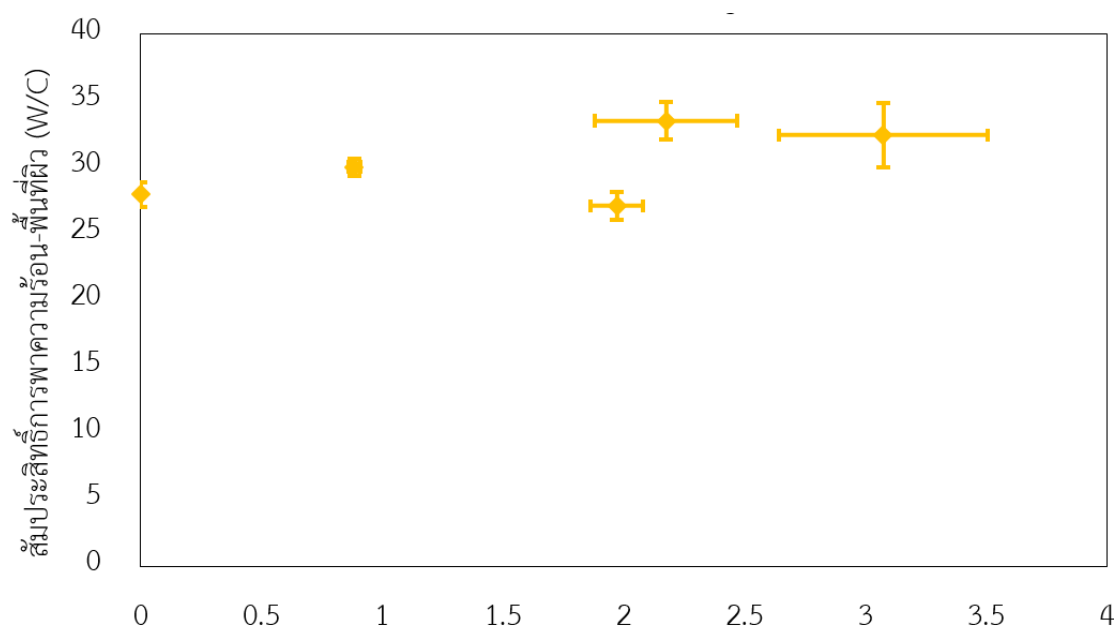
ก. ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 kg/s



ค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่น (e/L) (E-5)

ข. ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 kg/s

รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสในช่วงที่ผิวอิมเมอร์ด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 kg/s



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวของพีวีซีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสในช่วงที่ผิวอิมมัวด้วยน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ  $0.3 - 0.6 \text{ kg/s}$  (ต่อ)

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวพีวีซีในเทอมไร้  
หน่วยค่าความหยาบผิวต่อความยาวแผ่น ( $e/L \times 10^{-5}$ ) ต่อประสิทธิภาพลิมิต และจากรูปที่ 4.13

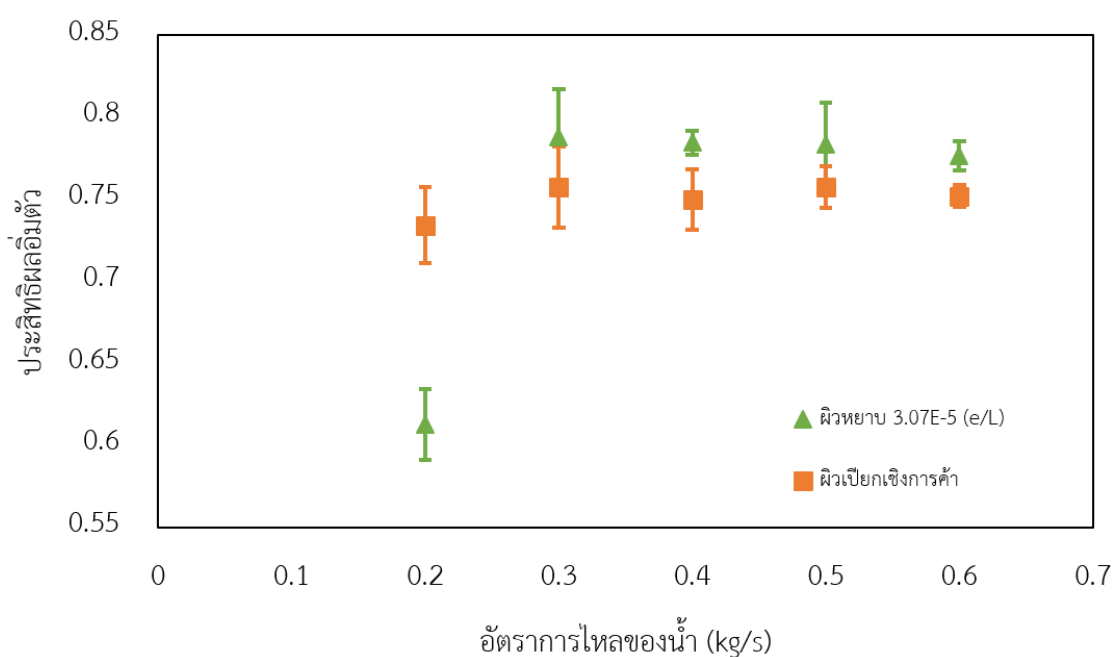
เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวพิวรีซีในเทอมไร้หน่วยค่าความหนาแน่นผิวต่อความยาวแผ่น ( $e/L \times 10^{-5}$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียสที่ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นผิวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิผลอิมตัวเพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ในเชิงเส้น เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.13 ก็ควรจะมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นเช่นเดียวกัน เห็นได้จากจากสมการที่ 3.8 รวมถึงรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวพิวรีซีในเทอมไร้หน่วยค่าความหนาแน่นผิวต่อความยาวแผ่น ( $e/L \times 10^{-5}$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียสที่ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งจะมีแนวโน้มเป็นความสัมพันธ์ในเชิงเส้นไปในทิศทางเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่นำมาคูณเท่ากันหรือเป็นตัวแปรควบคุมนั่นเอง

จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะมีบางส่วนของกราฟที่มีแนวโน้มไม่ได้ไปในทิศทางเดียวกัน ดังเช่น รูปที่ 4.12ง ประสิทธิผลอิมตัวจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นผิวพิวรีซี แต่รูปที่ 4.13ง ที่ความหนาแน่นผิว 0 กลับมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าพิวรีซีที่มีความหนาแน่นผิว 0.884 และ 1.97 ทั้งนี้เนื่องจากเทอมของความเร็วอากาศ  $v$  ถูกควบคุมไว้ที่ 0.25 เมตรต่อวินาที ซึ่งส่งผลโดยตรงกับอัตราการไหลของอากาศ  $q_u$  ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที แต่ในทางปฏิบัติจะควบคุมได้ยากมากทำให้ค่าความเร็วของอากาศที่ถูกบันทึกจริงจะอยู่ในช่วง 0.24 – 0.29 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะแปรผันโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 3.8 ในบทที่ 3

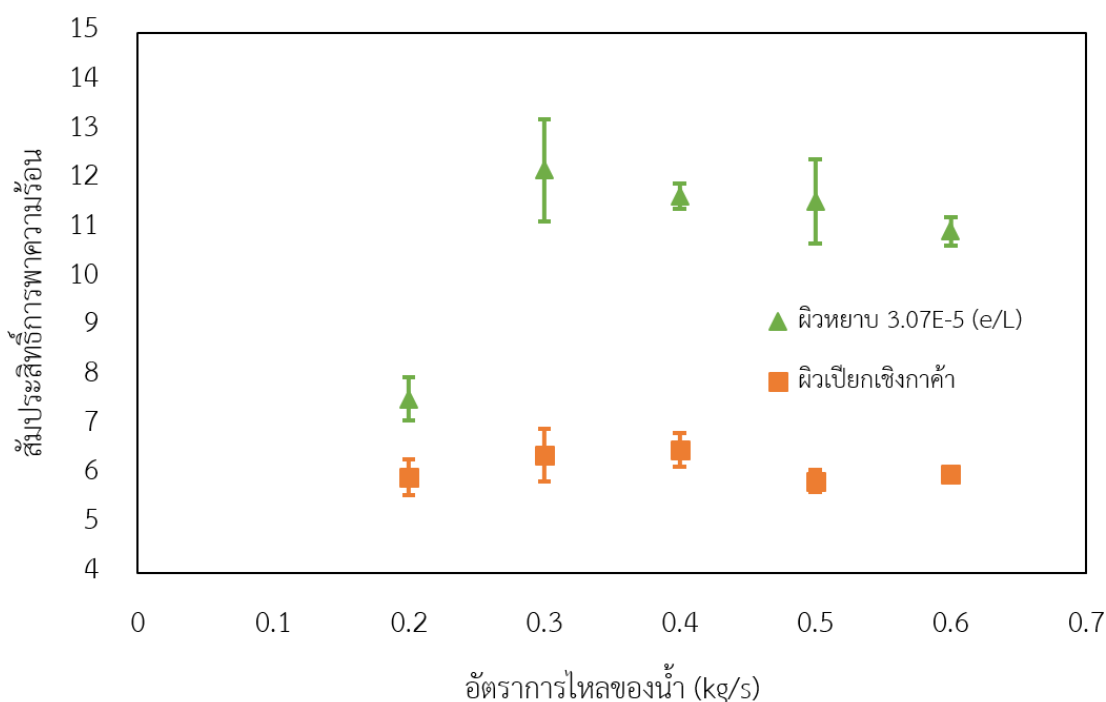
#### 4.3 การเปรียบเทียบผิวเปียกพิวรีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับประสิทธิผลอิมตัวของผิวเปียกของผิวเปียกพิวรีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า ที่ปริมาตรเท่ากันคือ 0.0104 ลูกบาศก์เมตร แต่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่างกัน โดยผิวเปียกพิวรีซีจะมีพื้นที่ผิวสัมผัส 2.8 ตารางเมตร และผิวเปียกเชิงการค้าจะมีพื้นที่ผิวสัมผัส 4.968 ตารางเมตร จากหัวข้อที่ 4.2 ผิวเปียกพิวรีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดคือผิวเปียกพิวรีซีที่มีความหนาแน่นผิว 3.07 จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าผิวเปียกเชิงการค้าจะอิมตัวด้วยน้ำง่ายกว่าผิวเปียกจากพิวรีซี เนื่องจากผิวเปียกพิวรีซีทำจากกระดาษทำให้ซับน้ำและอุ้มน้ำได้ดีกว่า และอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิผลอิมตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผิวเปียกเชิงการค้า สังเกตจากช่วงที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที ผิวเปียกเชิงการค้ามีประสิทธิผลอิมตัว 0.73 ส่วนผิวเปียกพิวรีซีจะมีประสิทธิผลอิมตัวเพียง 0.61 แตกต่างกันถึง 12% แต่หลังจากช่วงที่ผิวเปียกพิวรีซีอิมตัวด้วยน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 และ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที ผิวเปียกพิวรีซีจะมีประสิทธิผลอิมตัวอยู่

ที่ 0.79 และ 0.78 ตามลำดับ ส่วนของผิวเปียกเชิงการค้าอยู่ที่ 0.76 และ 0.76 ตามลำดับ แต่จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 และ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที ผิวเปียกพีวีซีจะมีประสิทธิภาพลุ่มตัวอยู่ที่ 0.78 และ 0.76 ตามลำดับ ส่วนของผิวเปียกเชิงการค้าอยู่ที่ 0.75 และ 0.75 ตามลำดับ และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้จากข้อมูลข้างต้นพอจะสรุปได้ว่าหลังจากที่ผิวเปียกพีวีซีลุ่มตัวด้วยน้ำแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพผิวเปียกสูงกว่าผิวเปียกเชิงการค้าอยู่ 2%

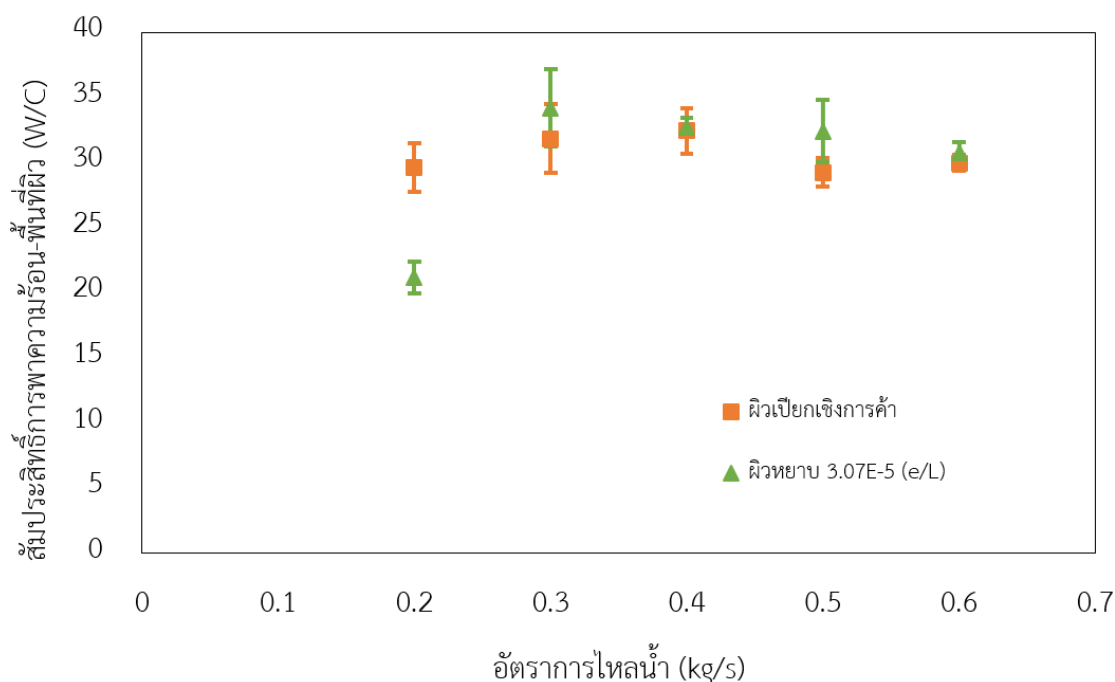


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับประสิทธิภาพลุ่มตัวของผิวเปียกของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า ที่ปริมาตรชุดทดสอบเท่ากับ 0.0104 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดในเชิงการค้า

จากรูปที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดในเชิงการค้า จากรูปที่ 4.16 นี้ จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ผิวเปียกพีวีซียังไม่อิมตัวด้วยน้ำมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 7.55 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส ก็ยังมากกว่าผิวเปียกเชิงการค้าที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 5.96 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส และหลังจากที่ผิวเปียกพีวีซีอิมตัวด้วยน้ำแล้วที่ 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ที่ 12.21, 11.69, 11.57 และ 10.97 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่ผิวเปียกเชิงการค้ามีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแค่เพียง 6.39, 6.52, 5.88 และ 6.03 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ากันเกือบ 50% ในขณะที่พื้นที่ผิวของผิวเปียกเชิงการค้ามากกว่าผิวเปียกพีวีซีถึง 1.78 เท่า



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาทีกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสในหน่วยวัตต์ต่อองศาเซลเซียสของผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 นี้จะเห็นว่าช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ผิวเปียกพีวีซียังไม่อิมตัวด้วยน้ำ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสของผิวหยาบอยู่ที่ 21.14 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ในขณะที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกเชิงการค้าจะอยู่ที่ 29.61 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส จะเห็นว่าผิวเปียกเชิงการค้าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสมากกว่าผิวเปียกพีวีซีอยู่ที่ 8.47 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส แต่หากพิจารณาช่วงที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ผิวเปียกพีวีซีอิมตัวด้วยน้ำแล้ว มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสอยู่ที่ 34.19, 32.72, 32.40 และ 30.72 วัตต์ต่อองศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่ผิวเปียกเชิงการค้ามีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสอยู่ที่ 31.83, 32.41, 29.23 และ 29.95 วัตต์ต่อองศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นว่าผิวเปียกพีวีซีจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวน้ำที่ผิวสัมผัสดีกว่าเล็กน้อย และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้นยังพอจะสรุปได้ว่า ผิวเปียกพีวีซีที่มีความหยาบเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนผิวเปียกเชิงการค้าจากเซลล์ลูโลสในระบบทำความเย็นแบบระเหยได้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัย

จากการศึกษาวัสดุทดแทนพีวีซีในระบบทำความเย็นแบบระเหย เพื่อนำมาทดแทนผิวเปียกเชิงการค้าเซลลูโลส ค่าความหยابผิวและลักษณะทางกายภาพของพีวีซีผิวหยาบ, อัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพลดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าความหยابผิวของพีวีซีที่มีผลต่อประสิทธิภาพลดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 คุณลักษณะของพีวีซีผิวเรียบและผิวหยาบ

จากการศึกษาคุณลักษณะของพีวีซีผิวเรียบและพีวีซีผิวหยาบสรุปได้ว่า ลักษณะการไหลทางกายภาพของน้ำที่พีวีซีผิวเรียบน้ำจะไหลอย่างรวดเร็วและเป็นเส้นตรง ไม่กระมีความสามารถในการกระจายน้ำ แต่จะไหลช้าลงและกระจายน้ำได้ดีตามความหยาบผิวพีวีซีที่เพิ่มขึ้น และกระจายน้ำได้ดีที่สุดที่ความหยาบผิวสูงที่สุด รวมถึงการที่ผิวมีความหยาบเพิ่มขึ้นจะทำให้ น้ำไหลแพร่ออกทางด้านข้างมากกว่าพีวีซีที่มีความหยาบต่ำ และยังพบอีกว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นจะไม่ค่อยส่งผลต่อการกระจายน้ำอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย และเมื่อเราพิจารณาถึงลักษณะการยึดเกาะของน้ำบนแผ่นพีวีซีจะพบว่าที่พีวีซีแผ่นเรียบน้ำจะยึดเกาะผิวน้อยหรือแทบจะไม่ยึดเกาะผิวได้เลย แต่กับแผ่นพีวีซีที่มีความหยาบผิวจะยึดเกาะได้ดี ลักษณะทางกายภาพของน้ำจะกระจายตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ และจะยึดเกาะได้ดีขึ้นเมื่อความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ความหยาบผิวสูงที่สุด

#### 5.2 การทดสอบคุณลักษณะการทำความเย็นของพีวีซีเมื่อใช้เป็นผิวเปียก

จากการศึกษาคุณลักษณะการทำความเย็นของพีวีซีเมื่อใช้เป็นผิวเปียก สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ (อัตราการใช้น้ำ) 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที ผิวเปียกจากพีวีซีจะมีประสิทธิภาพลดอุณหภูมิที่ 0.45 – 0.61 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่ 4.73 – 7.55 วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส เนื่องจากผิวเปียกยังไม่อิมตัวด้วยน้ำ แต่หลังจากที่อัตราการไหลของน้ำสูงถึงจุดหนึ่งที่ 0.3 – 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะมีประสิทธิภาพลดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผิวเปียกจากพีวีซีอิมตัวด้วยน้ำ และในแต่ละความหยาบผิวจะมีประสิทธิภาพลดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอีกต่อไป เนื่องจากผิวเปียกอิมตัวด้วยน้ำแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละความหยาบผิวจากจุดที่ผิวอิมตัวแล้วนี้จะเห็นว่าประสิทธิภาพลดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวเปียกพีวีซีจะสูงขึ้นตามความหยาบผิวของผิวเปียก และสูงสุดที่ค่า

ความหยาบต่อความยาวแผ่น ( $e/L$ ) ที่  $3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที อยู่ที่ 0.79 และ 12.21 วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาประกอบกับกราฟค่าความหยาบผิวพีวีซีกับประสิทธิภาพล่อตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อความหยาบผิวเปียกพีวีซีเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพล่อตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นไปด้วย

### 5.3 การเปรียบเทียบผิวเปียกพีวีซีกับผิวเชิงการค้า

จากการเปรียบเทียบผิวเปียกพีวีซีที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุดกับผิวเปียกเชิงการค้า สรุปได้ว่าที่ปริมาตรชุดทดสอบเท่ากัน ผิวเปียกเชิงการค้าให้ประสิทธิภาพล่อตัวต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อพิจารณาในช่วงที่ผิวเปียกพีวีซีอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วที่ 3% รวมถึงผิวเปียกพีวีซีจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ดีกว่าผิวเปียกเชิงการค้าอยู่ที่ 2.73 วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน แต่ผิวเปียกเชิงการค้าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าผิวเปียกพีวีซีถึง 1.78 เท่า และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส จะเห็นว่าผิวเปียกพีวีซีจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสดีกว่าเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ถ้าหากพิจารณาข้อมูลจากการทดลองทั้งประสิทธิภาพล่อตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ผิวเปียกจากพีวีซีที่มีความหยาบผิวเหมาะสมที่จะนำมาทดแทนแผ่นผิวเปียกเชิงการค้าเซลลูโลสได้

### 5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต

- ผิวหยาบที่แนะนำในงานวิจัยนี้คือผิวหยาบพีวีซี  $3.07 \times 10^{-5}$  ( $e/L$ ) ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศกับน้ำ 2.8 ตารางเมตร แต่หากสามารถเพิ่มความหยาบผิวหรือพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่านี้ได้จะทำให้ประสิทธิภาพล่อตัวเพิ่มขึ้นได้อีก รวมถึงเมื่อระบบใหญ่ขึ้นก็ควรเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้นตามไปด้วยเพื่อที่จะให้ประสิทธิภาพล่อตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ดีขึ้น

- งานวิจัยในอนาคตควรศึกษารูปทรงการจัดเรียงตัวของวัสดุผิวเปียกพีวีซี เนื่องจากรูปทรงการจัดเรียงตัวของผิวเปียกพีวีซีในงานวิจัยนี้เป็นแผ่นเรียบ จัดเรียงตัวเป็นแบบคريب จากการทดลองพบว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่ค่อยดี และผิวเปียกโดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะมีการขึ้นรูปให้เป็นแบบลอน

- งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาความเร็วหรืออัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพล่อตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุพีวีซี โดยงานวิจัยนี้ศึกษาแค่อัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพล่อตัวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

- งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาการอายุการใช้งานและการเกิดจุลชีพบนพื้นผิววัสดุพีวีซี เนื่องจากการทดลองผิวเปียกเชิงการค้า พบว่ามีการเกิดเชื้อราเล็กน้อยรวมถึงการเปื่อยยุ่ยของผิวเปียกเชิงการค้า

- งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาในส่วนของต้นทุนการผลิตผิววัสดุพีวีซีเพื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนของผิวเปียกเชิงการค้าเซลลูโลส เพื่อความคุ้มค่าในการเลือกใช้ผิวเปียก เนื่องจากในงานวิจัยไม่ได้มีการบันทึกต้นทุนการผลิตของผิวเปียกพีวีซี



## รายการสัญลักษณ์

|            |                                         |                        |
|------------|-----------------------------------------|------------------------|
| $A_{Le}$   | พื้นที่จำเพาะ                           | $m^2/m^3$              |
| $A_p$      | พื้นที่หน้าตัดท่อ                       | $m^2$                  |
| $A_s$      | พื้นที่ผิวสัมผัส                        | $m^2$                  |
| $C_{p,a}$  | ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ               | $kJ/kg-K$              |
| $C_{p,u}$  | ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยอากาศและไอน้ำ    | $kJ/kg-K$              |
| $C_{p,v}$  | ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ               | $kJ/kg-K$              |
| $C_{p,w}$  | ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ                 | $kJ/kg-K$              |
| $D_h$      | เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ         | $m$                    |
| $h$        | เอนทาลปี                                | $kJ/kg$                |
| $h_a$      | เอนทาลปีของอากาศ                        | $kJ/kg$                |
| $h_{a,s}$  | เอนทาลปีของอากาศที่ผิวสัมผัสอากาศกับน้ำ | $kJ/kg$                |
| $h_c$      | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน               | $W/m^2 \cdot ^\circ C$ |
| $h_e$      | เอนทาลปีที่ทางออก                       | $kJ/kg$                |
| $h_{g,i}$  | เอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่ทางเข้า       | $kJ/kg$ dry air        |
| $h_{g,e}$  | เอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่ทางออก        | $kJ/kg$ dry air        |
| $h_{g,wb}$ | เอนทาลปีที่แฉกหุ้มนิกระเปาะเปียกขาเข้า  | $kJ/kg$ dry air        |
| $h_i$      | เอนทาลปีที่ทางเข้า                      | $kJ/kg$                |
| $h_L$      | เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอ          | $kJ/kg$                |
| $h_m$      | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล                | $m/s$                  |
| $h_v$      | เอนทาลปีของไอน้ำ                        | $kJ/kg$                |
| $h_{v,s}$  | เอนทาลปีของไอน้ำที่ผิวสัมผัสอากาศกับน้ำ | $kJ/kg$                |
| $h_w$      | เอนทาลปีของน้ำ                          | $kJ/kg$                |
| $K$        | สัมประสิทธิ์การนำความร้อน               | $W/m-K$                |
| $L$        | ความหนาของวัสดุ                         | $m$                    |
| $L_e$      | ความยาวคุณลักษณะ                        | $m$                    |
| $Le$       | Lewis's Number                          |                        |
| $m_a$      | มวลของอากาศ                             | $kg$                   |

|                  |                                              |         |
|------------------|----------------------------------------------|---------|
| $m_v$            | มวลของไอน้ำ                                  | kg      |
| $\dot{m}_a$      | อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ                   | kg/s    |
| $\dot{m}_{a,e}$  | อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ทางเข้า         | kg/s    |
| $\dot{m}_{a,i}$  | อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ทางออก          | kg/s    |
| $\dot{m}_v$      | อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำในอากาศ            | kg/s    |
| $\dot{m}_w$      | อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ                     | kg/s    |
| Nu               | Nusselt Number                               |         |
| $P_a$            | ความดันอากาศ                                 | kPa     |
| $P_g$            | ความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิใดๆ            | kPa     |
| $P_{sat}$        | ความดันไอน้ำอิ่มตัว                          | kPa     |
| $P_v$            | ความดันไอน้ำ                                 | kPa     |
| Pr               | Prandtl Number                               |         |
| $\dot{Q}$        | อัตราการถ่ายเทความร้อน                       | kW      |
| $\dot{Q}_{cond}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของการนำความร้อน       | kW      |
| $\dot{Q}_{conv}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อน       | kW      |
| $\dot{Q}_{rad}$  | อัตราการถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน | kW      |
| $R_a$            | ค่าคงที่ของอากาศ                             | kJ/kg-K |
| $R_v$            | ค่าคงที่ของไอน้ำ                             | kJ/kg-K |
| Re               | Reynold Number                               |         |
| $T$              | อุณหภูมิ                                     | °C      |
| $T_{db}$         | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง                          | °C      |
| $T_{db,e}$       | อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางออก                 | °C      |
| $T_{db,i}$       | อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางเข้า                | °C      |
| $T_e$            | อุณหภูมิที่ทางออก                            | °C      |
| $T_i$            | อุณหภูมิที่ทางเข้า                           | °C      |
| $T_s$            | อุณหภูมิผิวสัมผัสอากาศกับน้ำ                 | °C      |
| $T_w$            | อุณหภูมิน้ำ                                  | °C      |
| $T_{wb}$         | อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้า       | °C      |
| $T_\infty$       | อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม                          | °C      |
| $v_a$            | ความเร็วอากาศ                                | m/s     |

|                     |                                                            |                     |
|---------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|
| $V$                 | ปริมาตร                                                    | $m^3$               |
| $\dot{W}$           | งาน                                                        | kW                  |
| $Z$                 | ค่าความต้านทานความร้อน                                     | $^{\circ}C/W$       |
| $\phi$              | ความชื้นสัมพัทธ์                                           | %                   |
| $\phi_e$            | ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออก                                  | %                   |
| $\phi_i$            | ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางเข้า                                 | %                   |
| $\omega$            | ความชื้นจำเพาะ                                             | kg water/kg dry air |
| $\omega_e$          | ความชื้นจำเพาะที่ทางออก                                    | kg water/kg dry air |
| $\omega_i$          | ความชื้นจำเพาะที่ทางเข้า                                   | kg water/kg dry air |
| $\omega_s$          | ความชื้นจำเพาะที่ผิวสัมผัสอากาศกับน้ำ                      | kg water/kg dry air |
| $\rho_a$            | ความหนาแน่นของอากาศ                                        | $kg/m^3$            |
| $\rho_w$            | ความหนาแน่นของน้ำ                                          | $kg/m^3$            |
| $\sigma$            | ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$ | $W/m^2 K^4$         |
| $\mu$               | ค่าความหนืดทางพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)                 | kg/m-s              |
| $\nu$               | ค่าความหนืดทางจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)               | $m^2/s$             |
| $\varepsilon$       | ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)                                |                     |
| $\varepsilon_{sat}$ | ประสิทธิภาพผลอิมตัวของผิวเปียก                             |                     |
| $\Delta H$          | ผลต่างของเอนทาลปี                                          | kJ                  |
| $\Delta KE$         | ผลต่างของพลังงานศักย์                                      | kJ                  |
| $\Delta PE$         | ผลต่างของพลังงานจลน์                                       | kJ                  |
| $\Delta T_{lm}$     | ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม                          | $^{\circ}C$         |

## รายการอ้างอิง

- [1] I. Oropeza-Perez, P.A. Østergaard, Active and passive cooling methods for dwellings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018) 531-544.
- [2] D.J.R. Watt, *Evaporative Air Conditioning Handbook*, 2nd ed., 1986.
- [3] S. Ghani, F. Bakochristou, E.M.A.A. ElBialy, S.M.A. Gamaledin, M.M. Rashwan, A.M. Abdelhalim, S.M. Ismail, Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12 (2019) 48-70.
- [4] D.K. Al Assaad, M.S. Orabi, N.K. Ghaddar, K.F. Ghali, D.A. Salam, D. Ouahrani, M.T. Farran, R.R. Habib, A sustainable localised air distribution system for enhancing thermal environment and indoor air quality of poultry house for semiarid region, *Biosystems Engineering*, 203 (2021) 70-92.
- [5] Y.M. Xuan, F. Xiao, X.F. Niu, X. Huang, S.W. Wang, Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 3535-3546.
- [6] G. Ulpiani, Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts, *Applied Energy*, 254 (2019).
- [7] L. Pérez-Urrestarazu, R. Fernández-Cañero, A. Franco, G. Egea, Influence of an active living wall on indoor temperature and humidity conditions, *Ecological Engineering*, 90 (2016) 120-124.
- [8] ANSI/ASAE, American Society of Agricultural, Biological Engineers A. ASABE Standard, in, *Heating, ventilating and cooling greenhouses*, 2008, pp. EP406.404.
- [9] P.A. Doğramacı, D. Aydın, Comparative experimental investigation of novel organic materials for direct evaporative cooling applications in hot-dry climate, *Journal of Building Engineering*, 30 (2020).
- [10] E.M. Ahmed, O. Abas, M. Ahmed, M.R. Ismail, Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan, *Saudi J Biol Sci*, 18 (2011) 45-51.
- [11] F.B. Czarick M, Plastic less effective than paper evaporative cooling pads, *World*

Poultrymeat, (2012) 28:26-29.

[12] A. Al-Mogbel, S. Hussain, M.Z. Rafique, M. Almeshaal, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF EVAPORATIVE COOLING SYSTEM FOR BUILDINGS UNDER HOT AND DRY ENVIRONMENTAL CONDITIONS, 51 (2020) 825-835.

[13] J.K. Jain, D.A. Hindoliya, Correlations for Saturation Efficiency of Evaporative Cooling Pads, Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 95 (2014) 5-10.

[14] J.K. Jain, D.A. Hindoliya, Experimental performance of new evaporative cooling pad materials, Sustainable Cities and Society, 1 (2011) 252-256.

[15] H. Lotfizadeh, H. Razzaghi, M. Layeghi, Experimental performance analysis of a solar evaporative cooler with three different types of pads, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 5 (2013) 063113.

[16] D. Bishoyi, K. Sudhakar, Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India, Energy and Buildings, 153 (2017) 190-200.

[17] P. Alamdari, S. Saedodin, M. Rejvani, Do non-metallic material and radiation shields affect the operation of direct evaporative cooling systems?, International Journal of Refrigeration, 114 (2020) 98-105.

[18] R.S. Kulkarni RK, Comparative performance anlysis of evaporative cooling pads of alternative configurations and materials, International Journal of Advances in Engineering & Technology, (2013) 6:1524-1534.

[19] A.K. Dhamneya, S.P.S. Rajput, A. Singh, Thermodynamic performance analysis of direct evaporative cooling system for increased heat and mass transfer area, Ain Shams Engineering Journal, 9 (2018) 2951-2960.

[20] F. Al-Sulaiman, Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling, Energy Conversion and Management, 43 (2002) 2267–2273.

[21] M.S. Ndukwu MC, A techno-economic assessment for viability of some waste as cooling pads in evaporative cooling system, Int J Agric & Biol Eng, 8 (2015) 151-158.

[22] M.F. Alam, A.S. Sazidy, A. Kabir, G. Mridha, N.A. Litu, M.A. Rahman, An experimental study on the design, performance and suitability of evaporative cooling system using different indigenous materials, in, 2017.

[23] N. Khosravi, D. Aydin, M. Karim Nejhad, P.A. Dogramaci, Comparative performance analysis of direct and desiccant assisted evaporative cooling systems using novel

candidate materials, *Energy Conversion and Management*, 221 (2020).

[24] P. Abohorlu Doğramacı, S. Riffat, G. Gan, D. Aydın, Experimental study of the potential of eucalyptus fibres for evaporative cooling, *Renewable Energy*, 131 (2019) 250-260.

[25] C.M. Liao, S. Singh, T.S. Wang, Characterizing the performance of alternative evaporative cooling pad media in thermal environmental control applications, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 33 (1998) 1391-1417.

[26] R. Rawangkul, J. Khedari, J. Hirunlabh, B. Zeghmatti, Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1 (2008) 117-131.

[27] S. Suranjan Salins, S.V.K. Reddy, S. Kumar, Experimental investigation on use of alternative innovative materials for sustainable cooling applications, *International Journal of Sustainable Engineering*, 14 (2021) 1207-1217.

[28] J.C.F.d. Melo Júnior, J.V.M. Bamberg, N.S. Machado, E.N.G. Caldas, M.S. Rodrigues, Evaporative cooling efficiency of pads consisting of vegetable loofah, *Comunicata Scientiae*, 10 (2019) 38-44.

[29] K.S. Soponpongpiat N, Recycled High-Density Polyethylene and Rice Husk as a Wetted Pad in Evaporative Cooling System, *American Journal of Applied Sciences*, 8 (2011) 186-191.

[30] S. He, Z. Guan, H. Gurgenci, K. Hooman, Y. Lu, A. M. Alkhedhair, Experimental study of film media used for evaporative pre-cooling of air, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014) 874-884.

[31] S. He, Y. Xu, G. Zhang, K. Hooman, M. Gao, Selection of wetted media for pre-cooling of air entering natural draft dry cooling towers, *Applied Thermal Engineering*, 114 (2017) 857-863.

[32] A. Franco, D. Valera, A. Peña, Energy Efficiency in Greenhouse Evaporative Cooling Techniques: Cooling Boxes versus Cellulose Pads, *Energies*, 7 (2014) 1427-1447.

[33] S. Folkman, Validation of the Long Life of PVC Pipes Steven Folkman, *Proceedings of the 17th Plastic Pipes Conference*, (2014).

[34] P. Liu, Z. Jin, J. Liang, Z. Liu, Z. Chen, F. Chen, H. Zhao, H. Xu, G. Zhu, Z. Zhao, Lifetime prediction and aging mechanism of unplasticized polyvinyl chloride filled with

calcium carbonate under long-term thermal and oxidative conditions, *Engineering Failure Analysis*, 157 (2024).

[35] L. Siroli, F. Patrignani, D.I. Serrazanetti, C. Chiavari, M. Benevelli, L. Grazia, R. Lanciotti, Survival of Spoilage and Pathogenic Microorganisms on Cardboard and Plastic Packaging Materials, *Front Microbiol*, 8 (2017) 2606.

[36] C.-C. Hsieh, S.-C. Yao, Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006) 962-974.

[37] L.C.C. M. R. Pais, E. T. Mahefkey, Surface Roughness and Its Effects on the Heat Transfer Mechanism in Spray Cooling, *Heat Transfer*, 114 (1992) 211-219.

[38] G.B. Sreeram V, Sathyanarayan S, Sawant D, Agonafer D, Kannan N, et al, Factors that Affect the Performance Characteristics of Wet Cooling Pads for Data Center Applications, *Annu IEEE Semicond Therm Meas Manag Symp* 2015, (2015) 195-202.

[39] P.A. Doğramacı, D. Aydın, Comparative experimental investigation of novel organic materials for direct evaporative cooling applications in hot-dry climate, *Journal of Building Engineering*, 30 (2020) 101240.

[40] T. Gunhan, V. Demir, A.K. Yagcioglu, Evaluation of the Suitability of Some Local Materials as Cooling Pads, *Biosystems Engineering*, 96 (2007) 369-377.

[41] P. Martínez, J. Ruiz, P.J. Martínez, A.S. Kaiser, M. Lucas, Experimental study of the energy and exergy performance of a plastic mesh evaporative pad used in air conditioning applications, *Applied Thermal Engineering*, 138 (2018) 675-685.

[42] J.R. Camargo, C.D. Ebinuma, J.L. Silveira, Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city, *International Journal of Refrigeration*, 28 (2005) 1124-1132.

[43] S.A. Nada, A. Fouda, M.A. Mahmoud, H.F. Elattar, Experimental investigation of energy and exergy performance of a direct evaporative cooler using a new pad type, *Energy and Buildings*, 203 (2019) 109449.

[44] S.A. Nada, H.F. Elattar, M.A. Mahmoud, A. Fouda, Performance enhancement and heat and mass transfer characteristics of direct evaporative building free cooling using corrugated cellulose papers, *Energy*, 211 (2020) 118678.

[45] C. Sheng, A.G. Agwu Nnanna, Empirical correlation of cooling efficiency and

transport phenomena of direct evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, 40 (2012) 48-55.

[46] I. Kovačević, M. Sourbron, The numerical model for direct evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, 113 (2017) 8-19.

[47] X. Chen, Y. Su, D. Aydin, X. Zhang, Y. Ding, D. Reay, R. Law, S. Riffat, Experimental investigations of polymer hollow fibre integrated evaporative cooling system with the fibre bundles in a spindle shape, *Energy and Buildings*, 154 (2017) 166-174.

[48] X. Chen, Y. Su, D. Aydin, Y. Ding, S. Zhang, D. Reay, S. Riffat, A novel evaporative cooling system with a polymer hollow fibre spindle, *Applied Thermal Engineering*, 132 (2018) 665-675.

[49] E. Velasco-Gómez, A. Tejero-González, J. Jorge-Rico, F.J. Rey-Martínez, Experimental Investigation of the Potential of a New Fabric-Based Evaporative Cooling Pad, *Sustainability*, 12 (2020).

[50] A. Sohani, M. Zabihiyivi, M.H. Moradi, H. Sayyaadi, H. Hasani Balyani, A comprehensive performance investigation of cellulose evaporative cooling pad systems using predictive approaches, *Applied Thermal Engineering*, 110 (2017) 1589-1608.

[51] K. Sellami, M.b. Feddaoui, N. Labsi, M. Najim, Y.K. Benkahla, Numerical Simulations of Heat and Mass Transfer Process of a Direct Evaporative Cooler From a Porous Layer, *Journal of Heat Transfer*, 141 (2019).

[52] J.M. Wu, X. Huang, H. Zhang, Numerical investigation on the heat and mass transfer in a direct evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 195-201.

[53] C.K. Liao CM, Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region, *Building and Environment*, 37 (2002) 177-187.

[54] V.D. Franco A, Madueño A, Peña A, Influence OF water and air flow ON the performance OF cellulose evaporative cooling pads used IN Mediterranean greenhouses, *American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032*, (2010) 565-576.

[55] A. Malli, H.R. Seyf, M. Layeghi, S. Sharifian, H. Behraves, Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads, *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 2598-2603.

- [56] V. Naveenprabhu, M. Suresh, Performance enhancement studies on evaporative cooling using volumetric heat and mass transfer coefficients, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 78 (2020) 504-523.
- [57] P.M. Cuce, S. Riffat, A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 (2016) 1240-1249.
- [58] A. Beshkani, R. Hosseini, Numerical modeling of rigid media evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006) 636-643.
- [59] W. S, *Handbook of air conditioning and refrigeration*, Michigan, 2000.
- [60] M. Barzegar, M. Layeghi, G. Ebrahimi, Y. Hamzeh, M. Khorasani, Experimental evaluation of the performances of cellulosic pads made out of Kraft and NSSC corrugated papers as evaporative media, *Energy Conversion and Management*, 54 (2012) 24-29.
- [61] A. Fouda, Z. Melikyan, A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011) 932-936.
- [62] A.R. Al-Badri, A.A.Y. Al-Waaly, The influence of chilled water on the performance of direct evaporative cooling, *Energy and Buildings*, 155 (2017) 143-150.
- [63] M. Yan, S. He, N. Li, X. Huang, M. Gao, M. Xu, J. Miao, Y. Lu, K. Hooman, J. Che, Z. Geng, S. Zhang, Experimental investigation on a novel arrangement of wet medium for evaporative cooling of air, *International Journal of Refrigeration*, 124 (2021) 64-74.
- [64] S.K. Dai YJ, Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material, *Applied Thermal Engineering*, 22 (2002) 1417-1430.
- [65] N. Gilani, A. Haghighi Poshtiri, Heat Exchanger Design of Direct Evaporative Cooler Based on Outdoor and Indoor Environmental Conditions, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6 (2014).
- [66] S. He, Z. Guan, H. Gurgenci, I. Jahn, Y. Lu, A. M. Alkhedhair, Influence of ambient conditions and water flow on the performance of pre-cooled natural draft dry cooling towers, *Applied Thermal Engineering*, 66 (2014) 621-631.
- [67] H.O. Korese JK, Experimental evaluation of bulk charcoal pad configuration on evaporative cooling effectiveness, *CIGR Journal*, 18 (2016) 11-21.
- [68] A. Franco, D.L. Valera, A. Peña, A.M. Pérez, Aerodynamic analysis and CFD

simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses, *Computers and Electronics in Agriculture*, 76 (2011) 218-230.

[69] L. Rong, P. Pedersen, T.L. Jensen, S. Morsing, G. Zhang, Dynamic performance of an evaporative cooling pad investigated in a wind tunnel for application in hot and arid climate, *Biosystems Engineering*, 156 (2017) 173-182.

[70] B. Halasz, A General Mathematical Model of Evaporative Cooling Devices, *Rev Gen Therm*, 37 (1998) 245-255.

[71] B.A. Qureshi, S.M. Zubair, A comprehensive design and rating study of evaporative coolers and condensers. Part I. Performance evaluation, *International Journal of Refrigeration*, 29 (2006) 645-658.

[72] C.D.E. J. R. Camargo, S. Cardoso, A Mathematical Model for Direct Evaporative Cooling Air Conditioning System, *Engenharia Térmica*, 4 (2003) 30-34.

[73] P. Naphon, Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (2005) 1066-1074.

[74] F.A. Obando, A.P. Montoya, J.A. Osorio, F.A. Damasceno, T. Norton, Evaporative pad cooling model validation in a closed dairy cattle building, *Biosystems Engineering*, 198 (2020) 147-162.

[75] S. Ibrahim, CFD Modeling of Surface Roughness in Laminar Flow, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, (2004) 1-8.

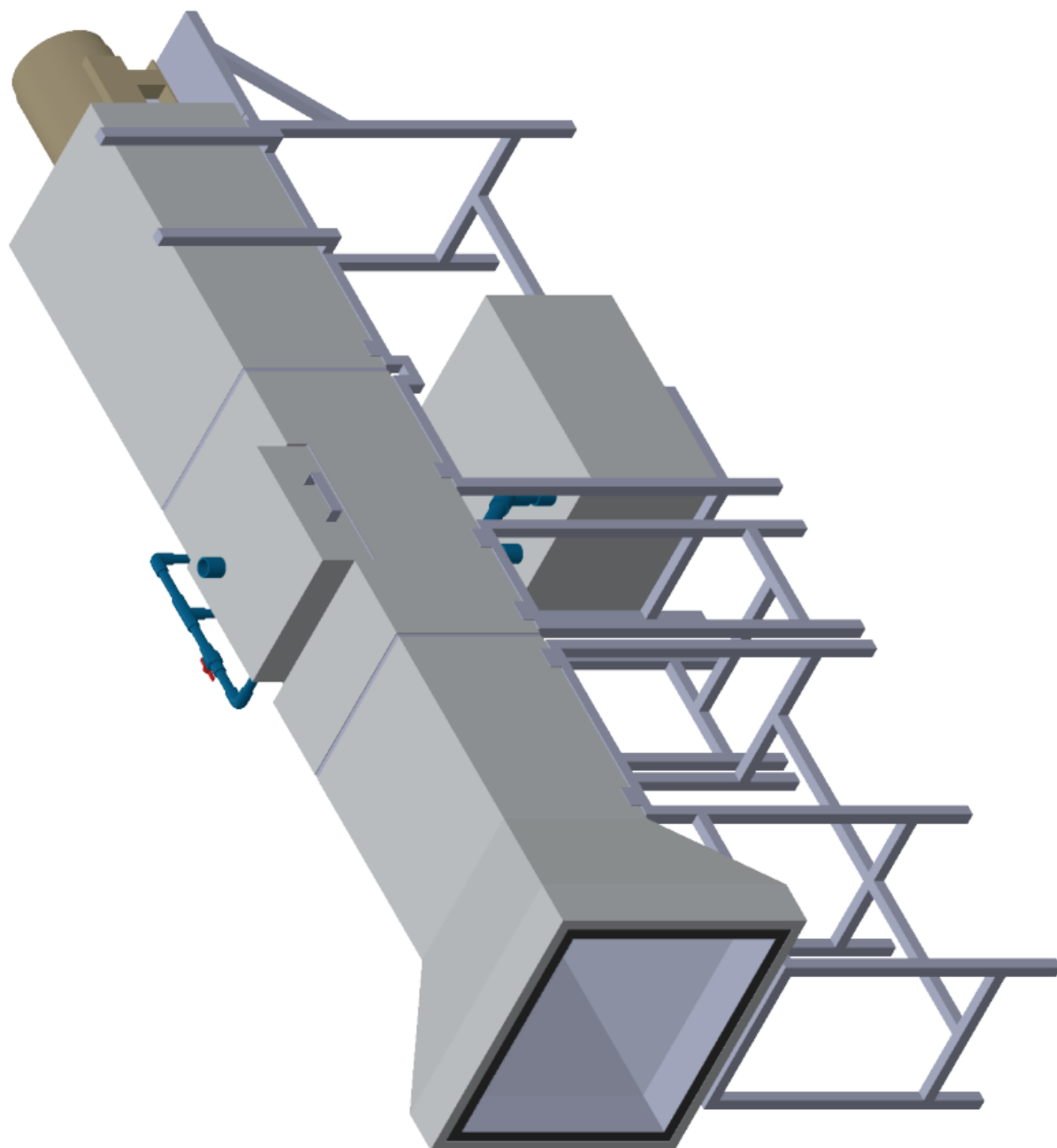
[76] K. Usta, A Study for The Effect of Surface Roughness on Resistance Characteristics of Flat Plates, *The Royal Institution of Naval Architects*, (2013).

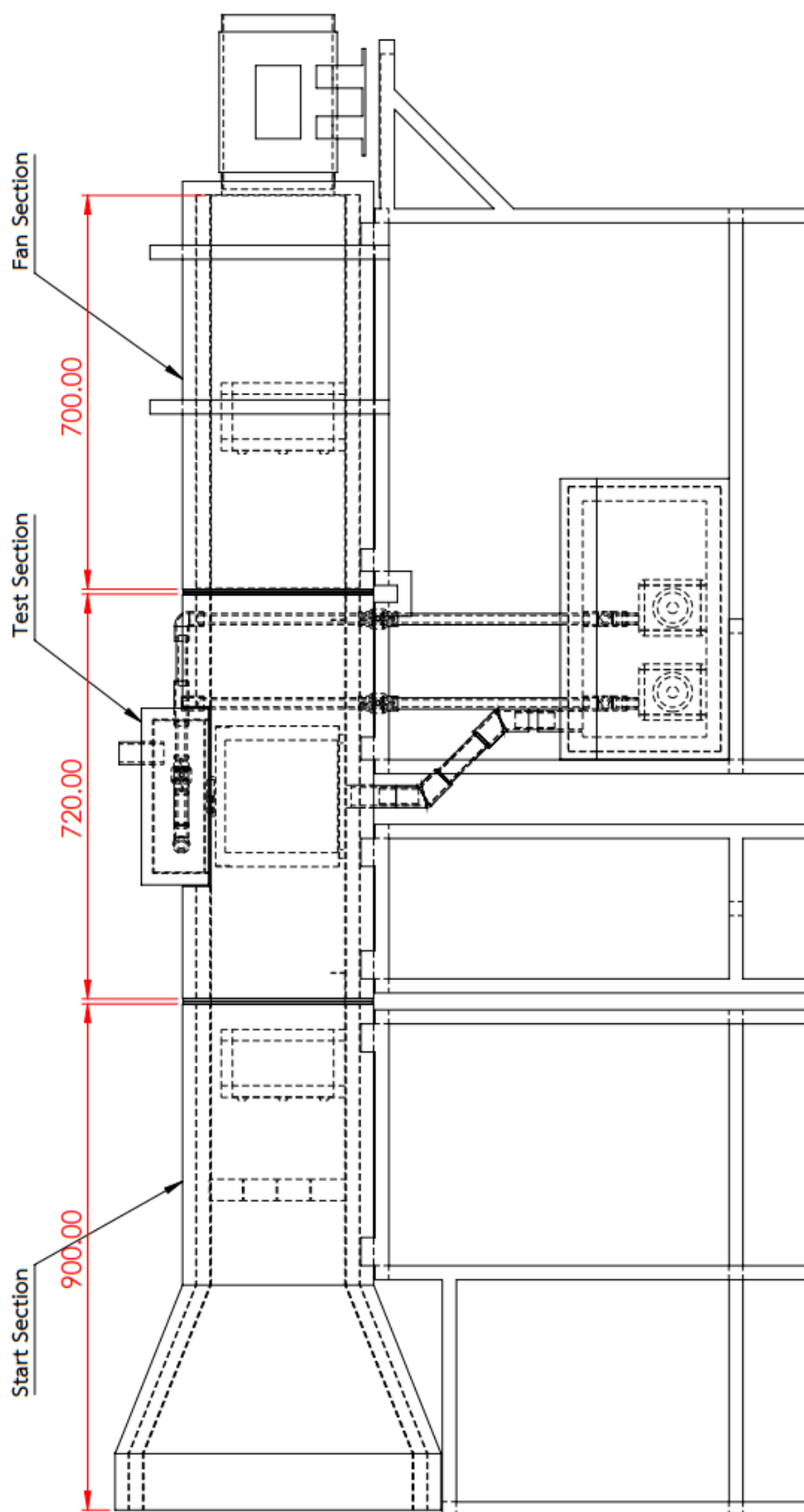
[77] S. Yadav, M. Kaushal, Varun, Siddhartha, Nusselt number and friction factor correlations for solar air heater duct having protrusions as roughness elements on absorber plate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44 (2013) 34-41.

[78] G. Croce, P. D'Agaro, Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer, *Superlattices and Microstructures*, 35 (2004) 601-616.

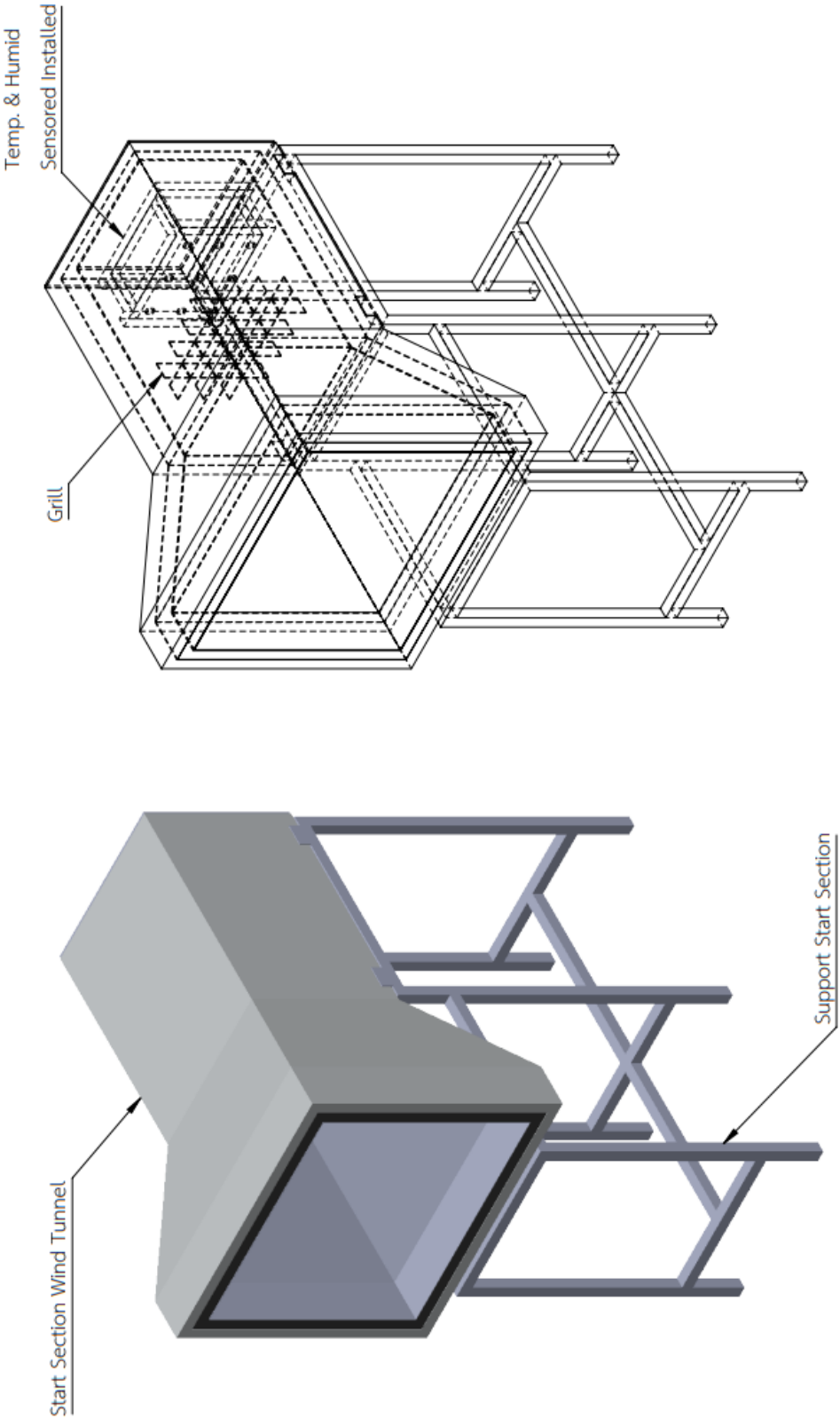




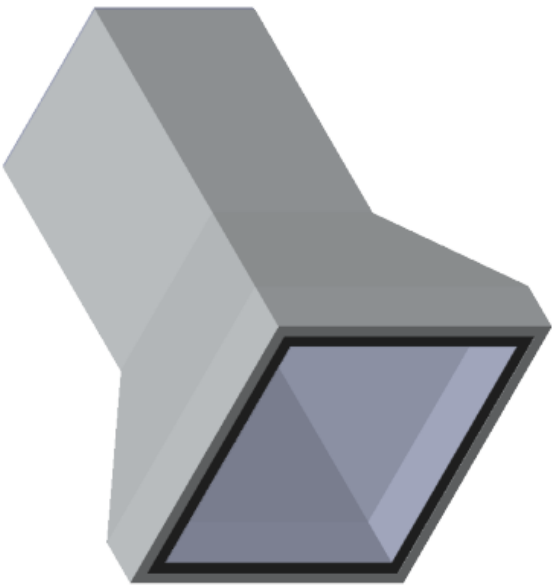
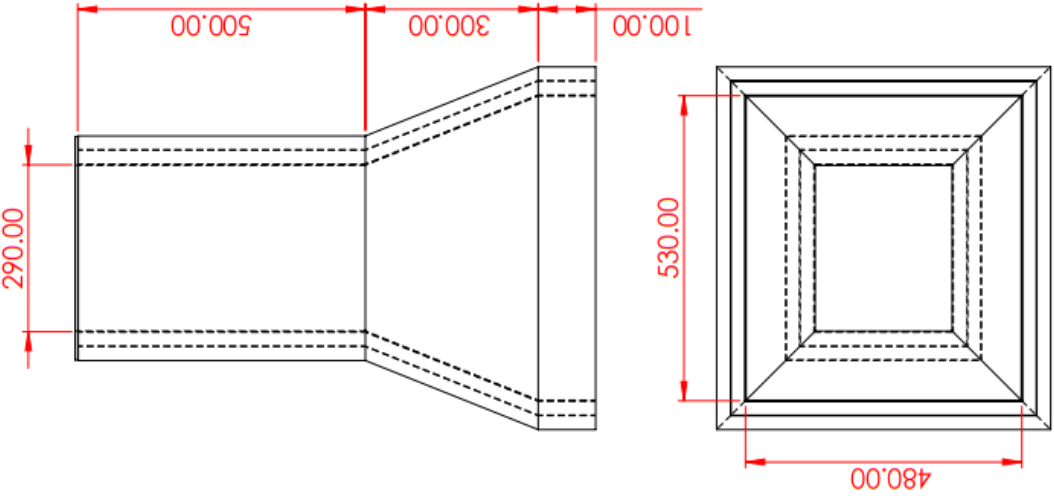




Start Section

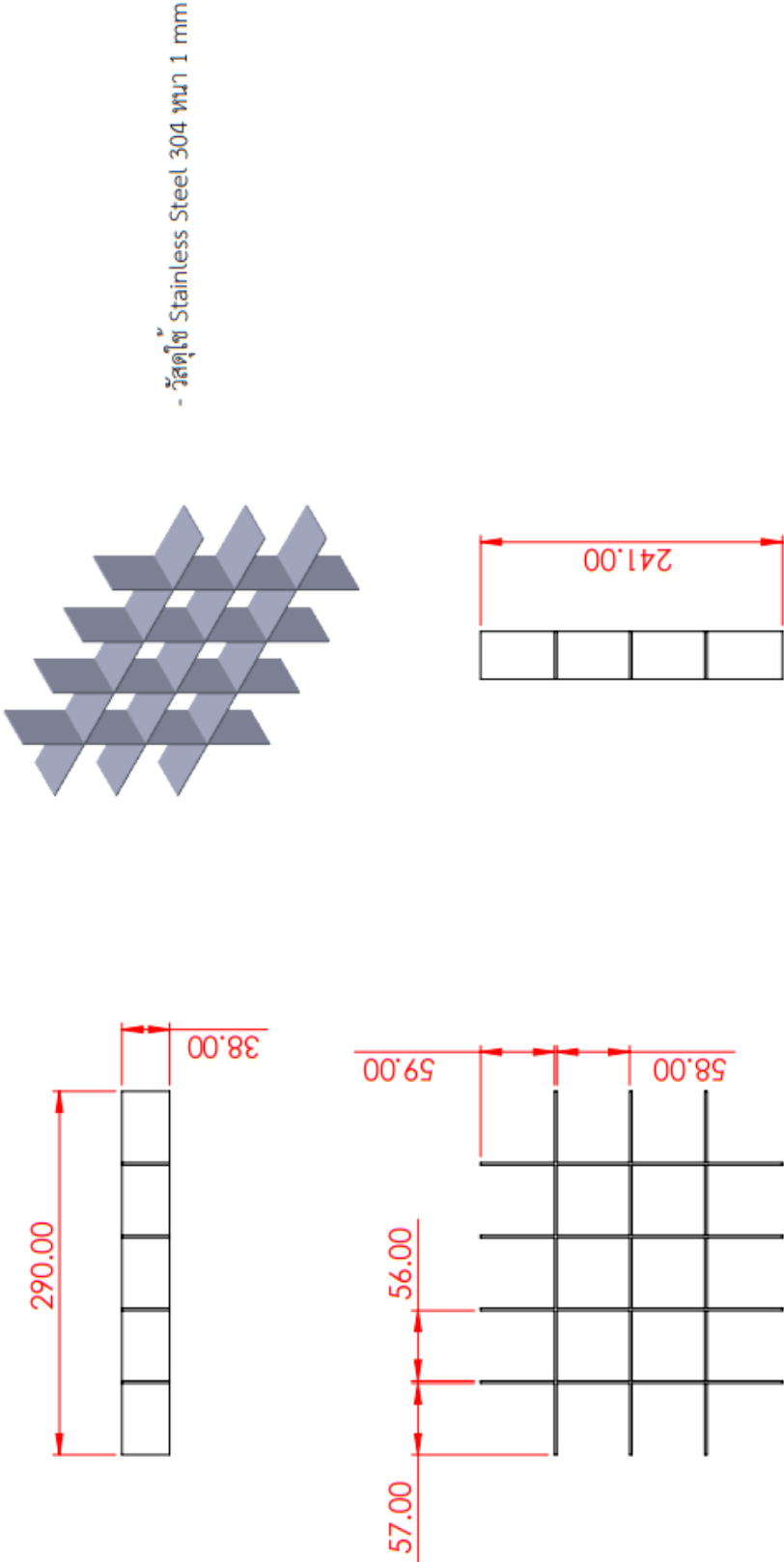


Start Section Wind Tunnel

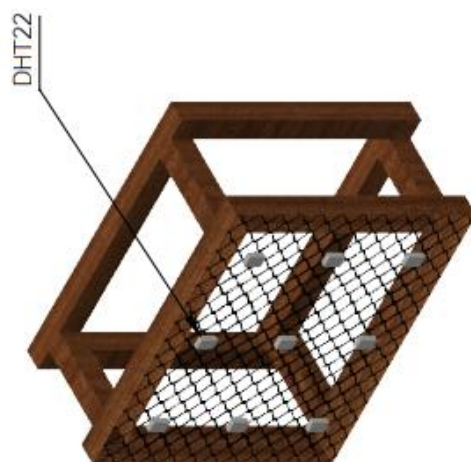
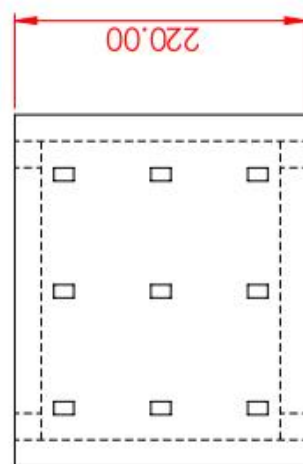
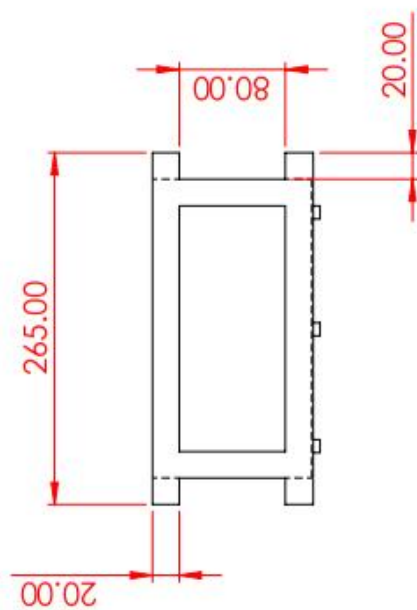


- อิมัลชันใช้ Stainless Steel 304  
หนา 1 mm.
- ฉนวนชั้นแรกสีดำคือฉนวน  
Aeroflex หนา 25 mm
- ฉนวนชั้นที่สองคือฉนวน PE  
หนา 15 mm
- หนาแปลนใช้ Flat bar Stainless  
Steel 2" หนา 4.5 mm

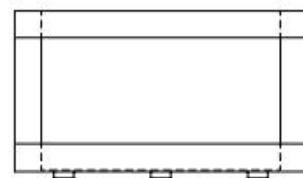
Grill



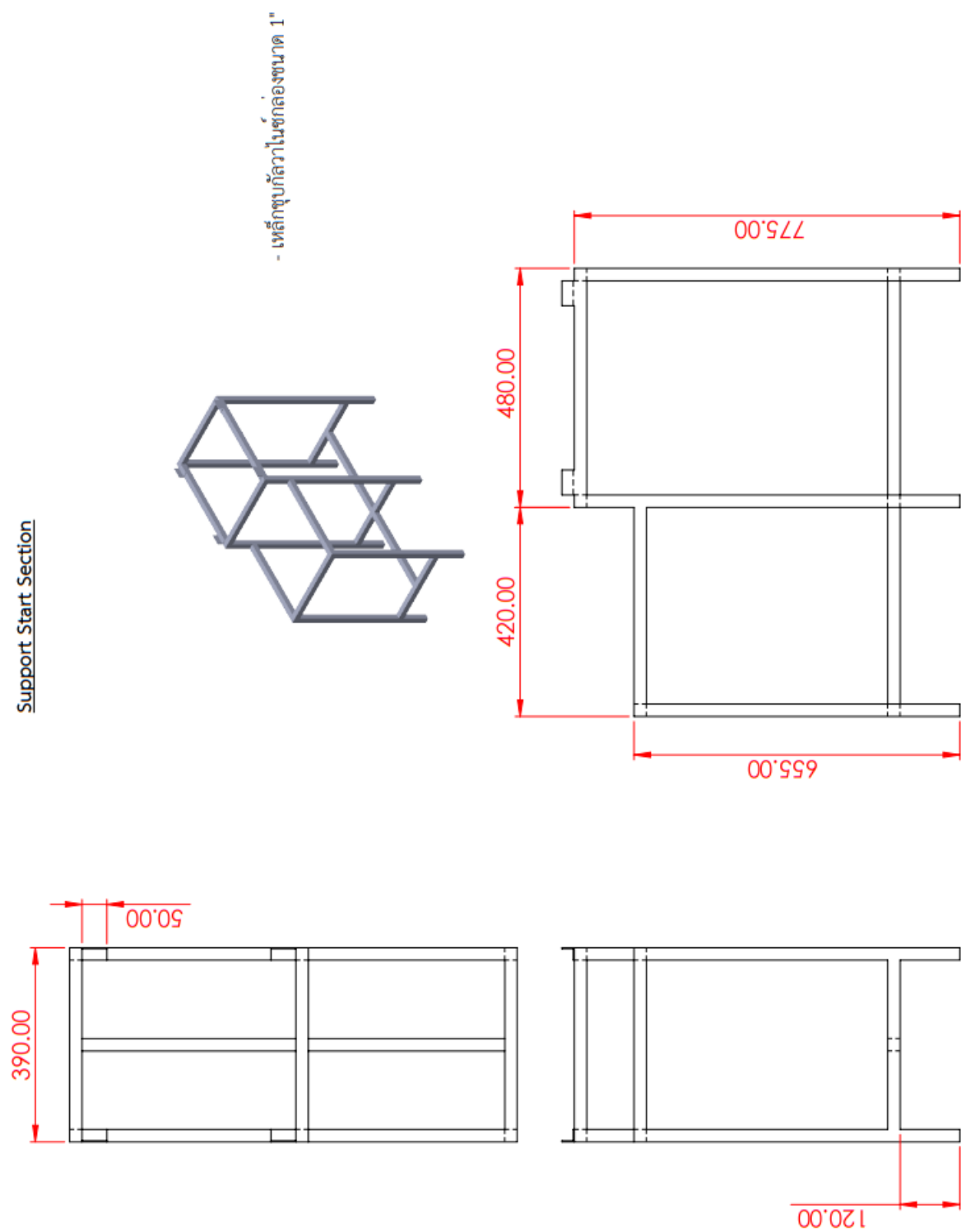
# Temp. and Humid Sensor Installed



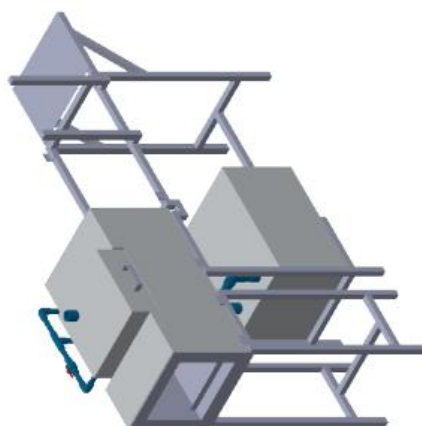
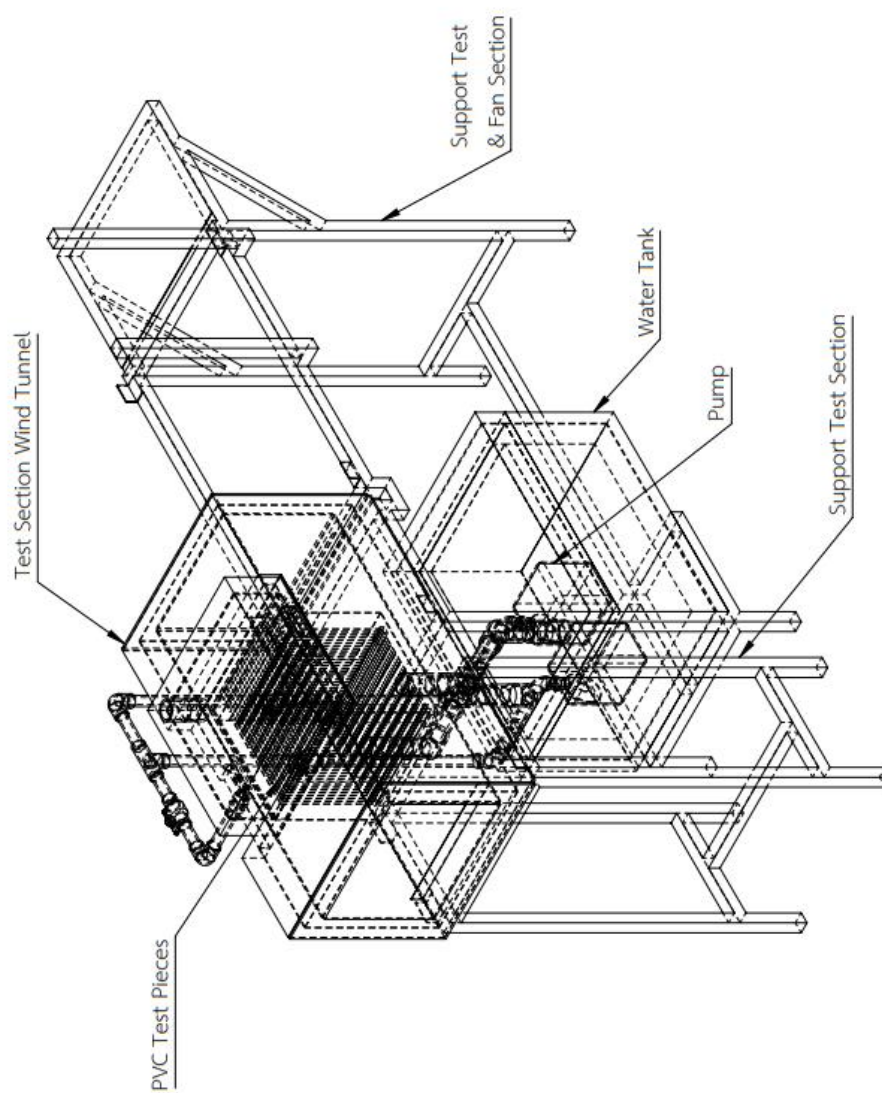
- วัสดุโครงไม้
  - ตะแกรงใยพลาสติก
  - เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น
- DHT22



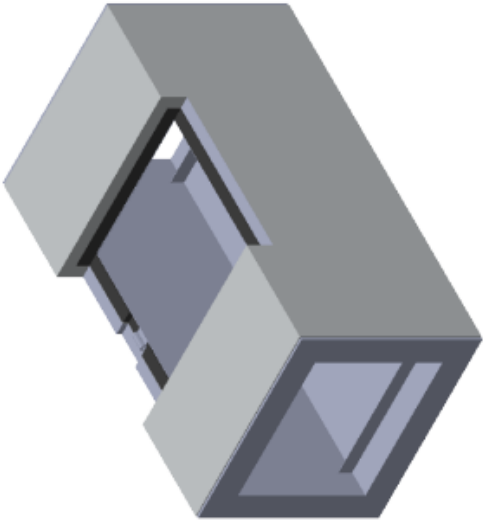
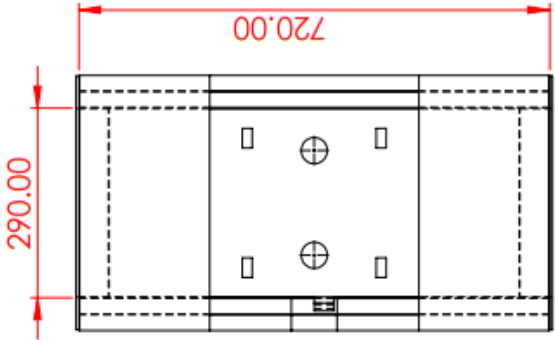
Support Start Section



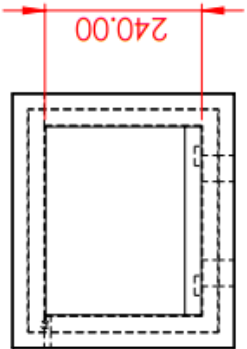
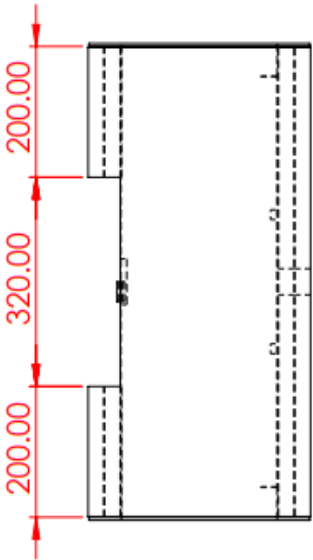
Test Section



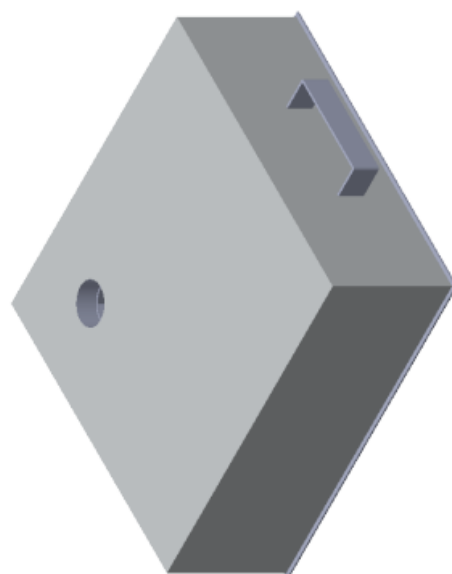
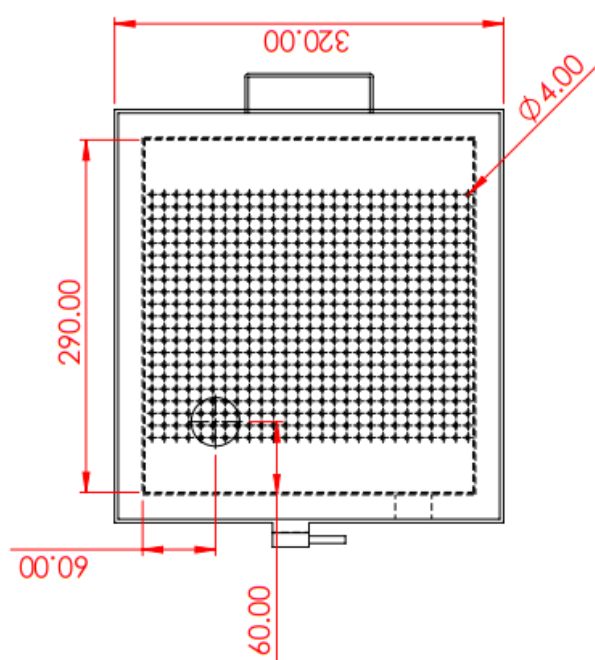
Test Section Wind Tunnel



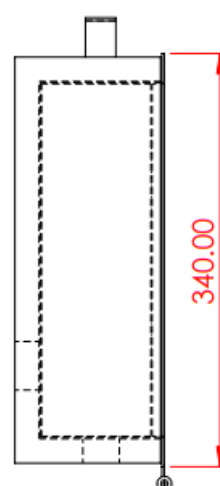
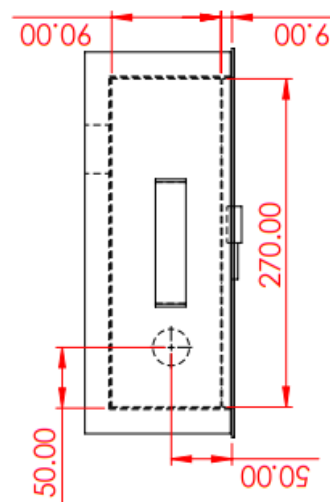
- อู๋มอลใช้ Stainless Steel 304  
หนา 1 mm
- ผนววนซ้นแรกด้วยนวน Aeroflex  
หนา 25 mm
- ผนววนซ้นที่สองด้วยนวน PE หนา  
15 mm
- หนาแปลนใช้ Flat bar Stainless  
Steel 304 2" หนา 4.5 mm

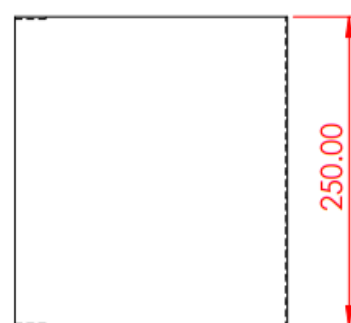
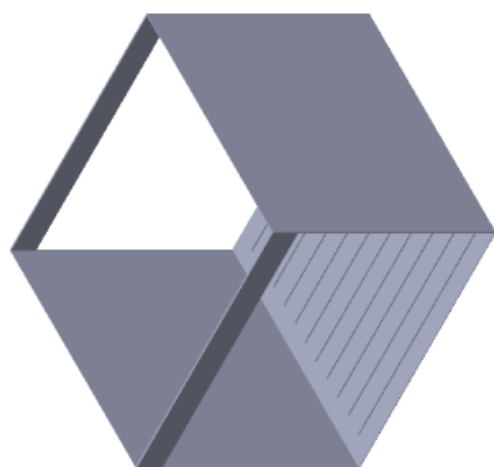
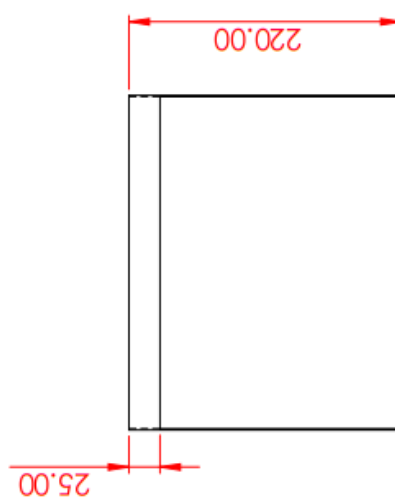
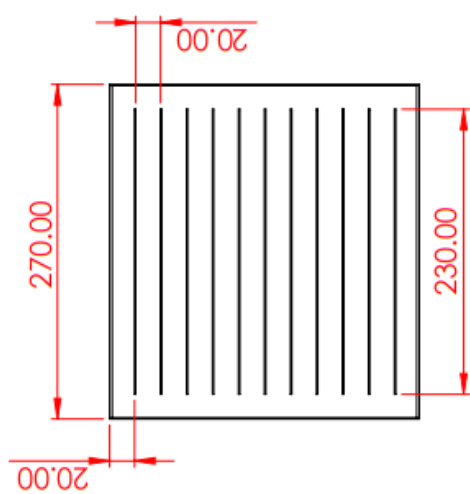


Test Section Lid



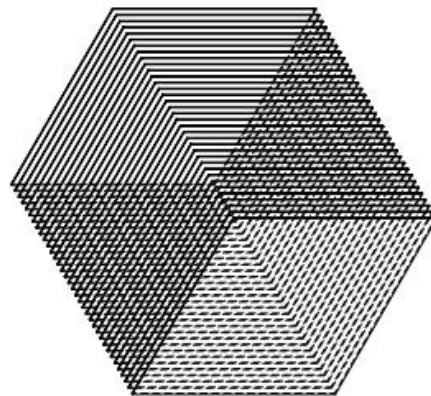
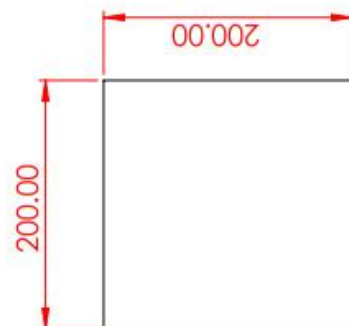
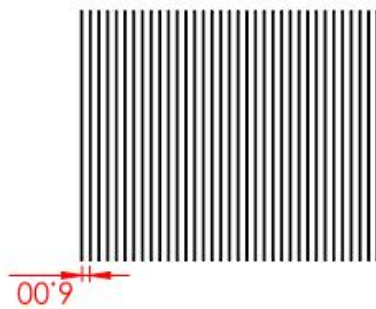
- ใช้ Stainless Steel 304 หนา 1 mm
- ผนวดยอนวน PE หนา 15 mm



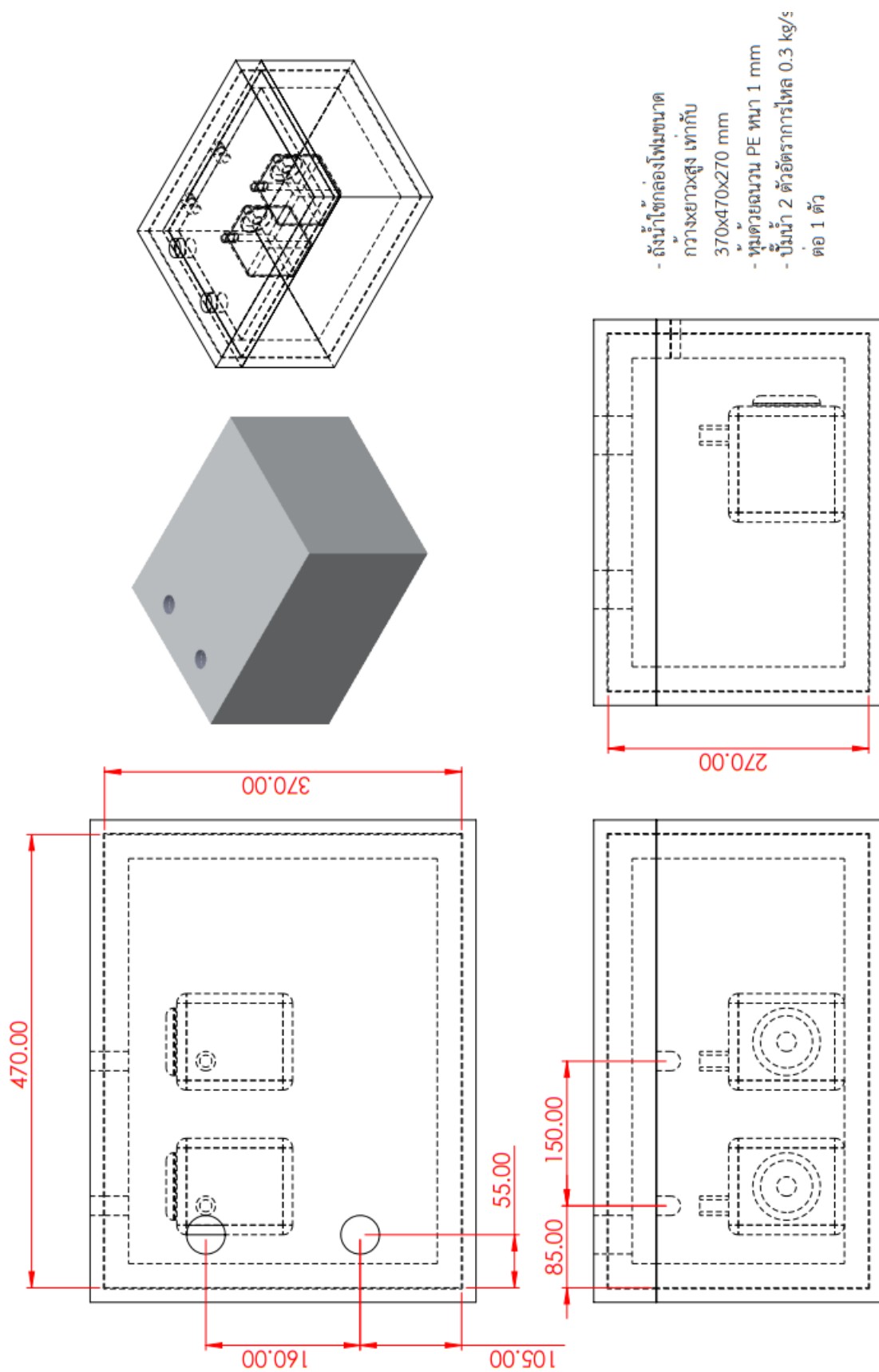
Test Set

- ขุดวางตัวเสาวัสดุใช้ Stainless Steel 304 ทน 1 mm
- เจาะรูน้ำทิ้งเป็นเส้นดัดแบบ

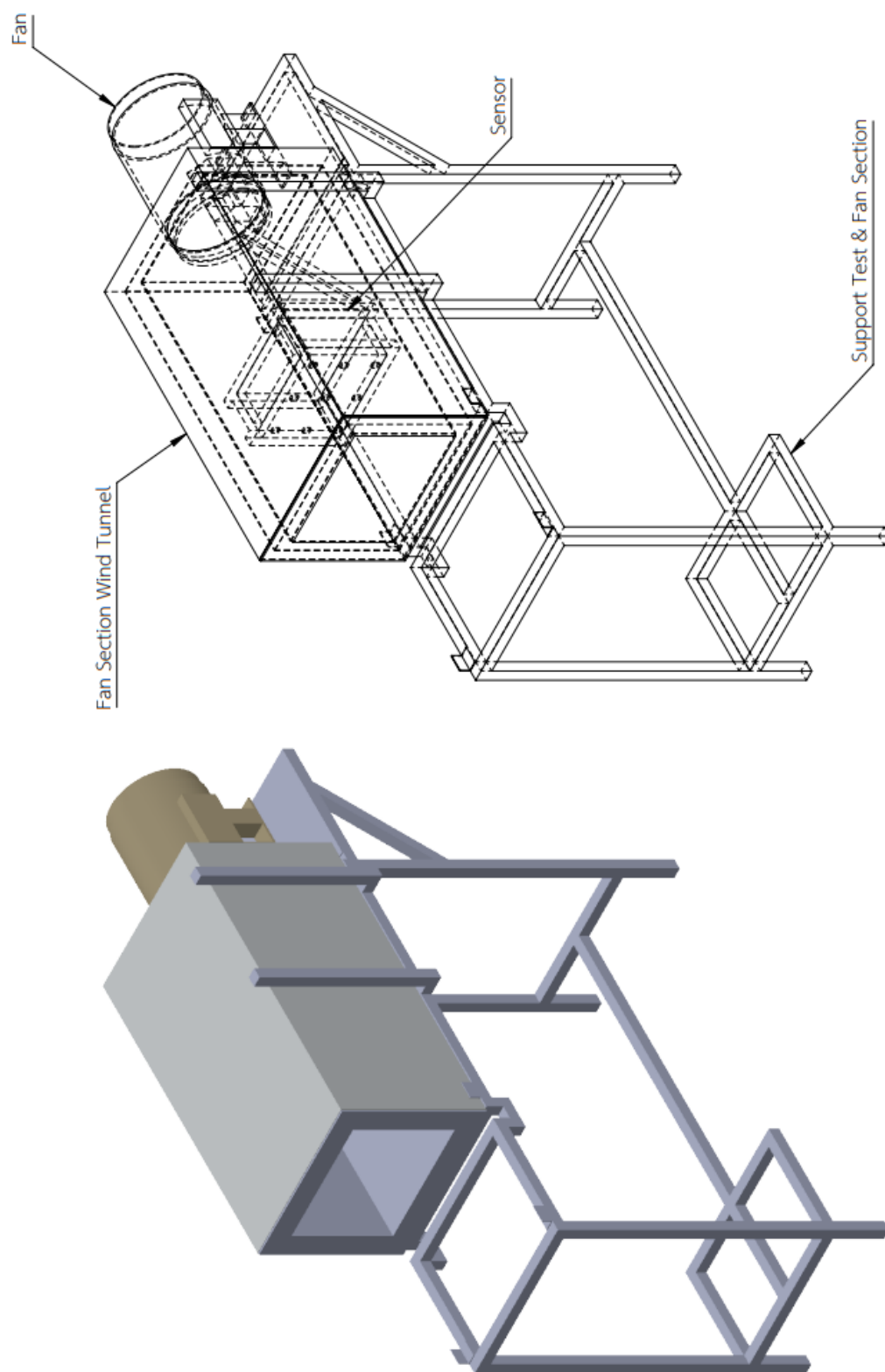
PVC Test Set



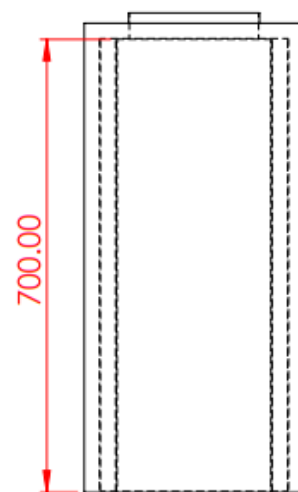
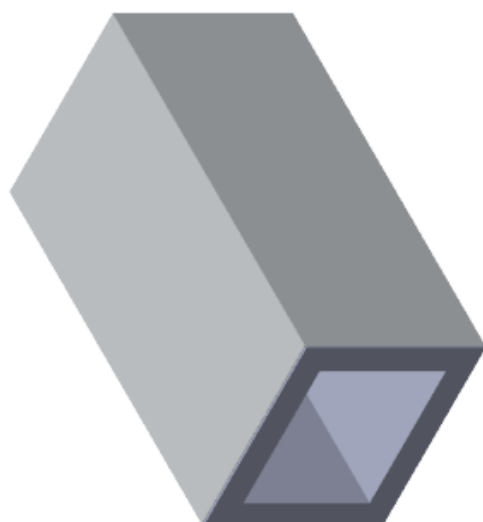
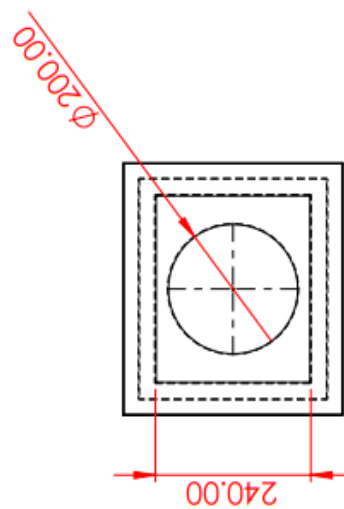
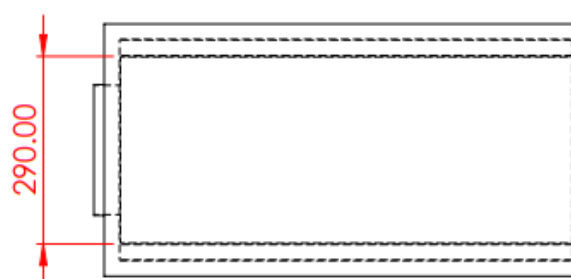
- ชุดแผ่นทดสอบ PVC ตัดเป็นแผ่นเรียบขนาด 200x200 mm
- เรียงท่างันคล้ายศรีบระบายความรอน ระยะห่าง 6 mm
- จำนวน 35 แผ่น
- มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความรอน 2.8 sq.m.

Water Tank

Fan Section

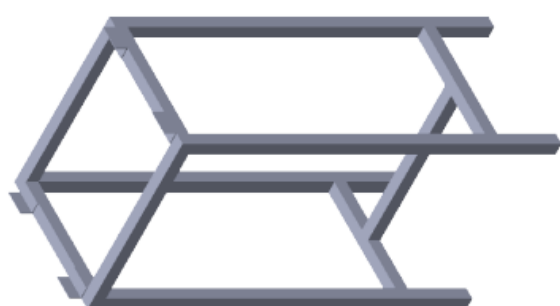


### Fan Section Wind Tunnel

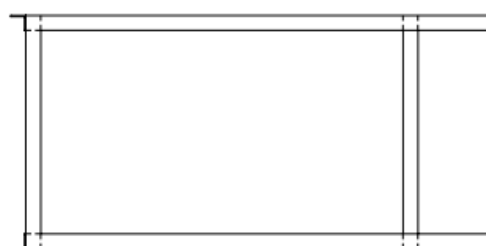
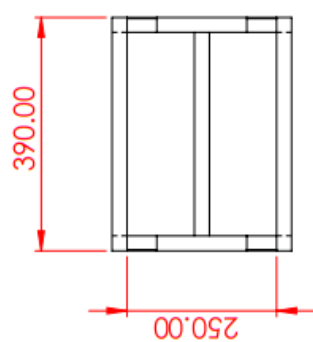
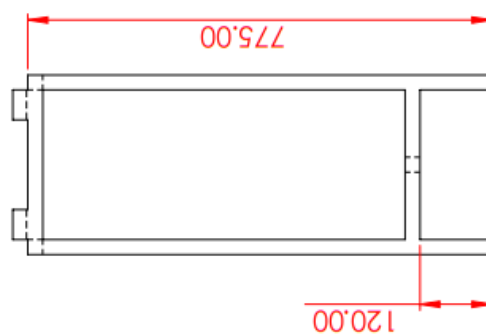


- ใช้อลูมิเนียมใช้ Stainless Steel 304  
หนา 1 mm
- ฉนวนชั้นแรกหุ้มด้วย Aeroflex หนา  
25 mm
- ฉนวนชั้นสองหุ้มด้วย PE หนา 15 mm
- หนาแผ่น Flat bar Stainless Steel  
304 2" หนา 4.5 mm

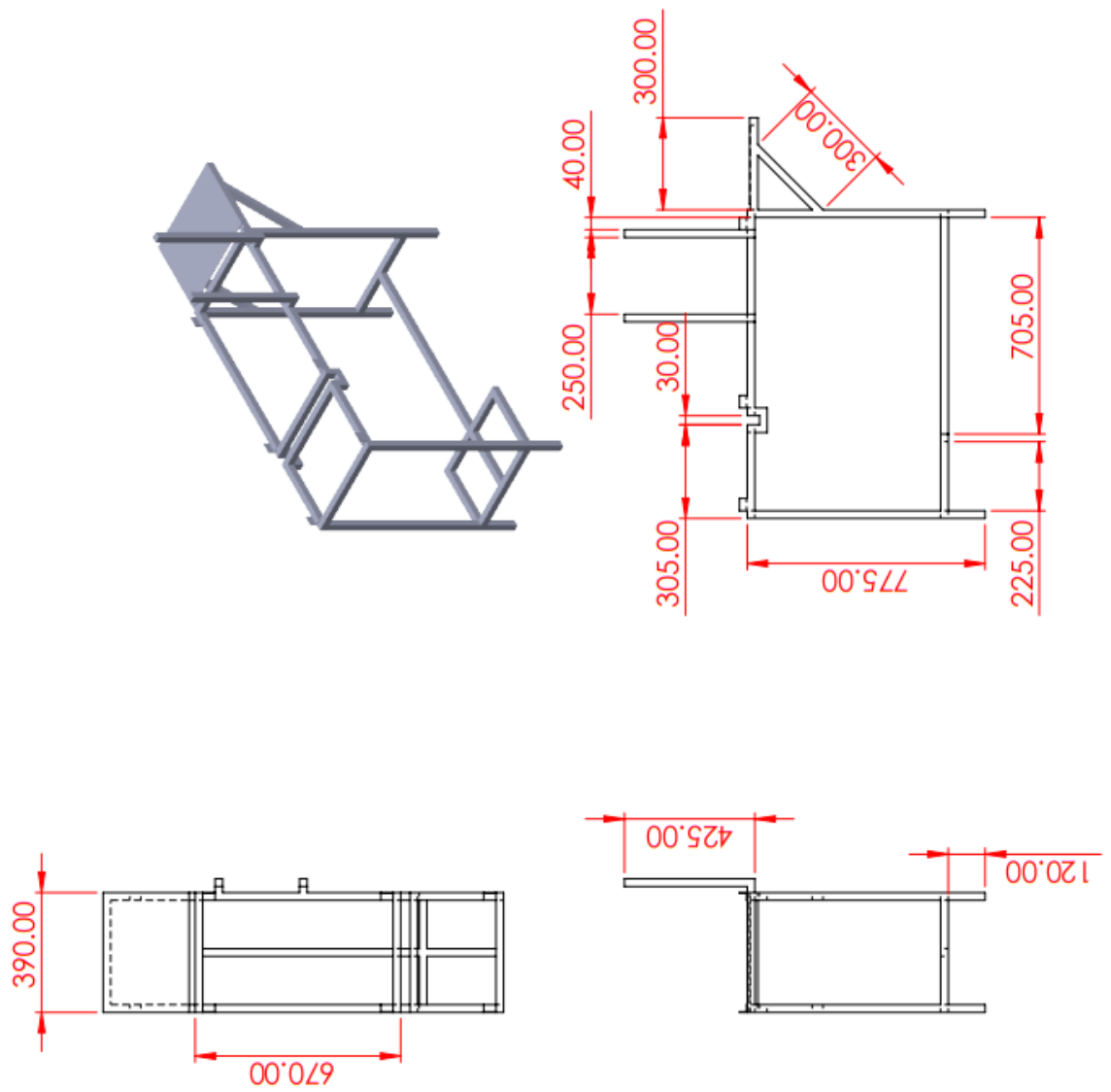
Support Test Section



- ไม้เหล็กกล่องชุบสังกะสี  
ขนาด 1"



Support Test & Fan Section

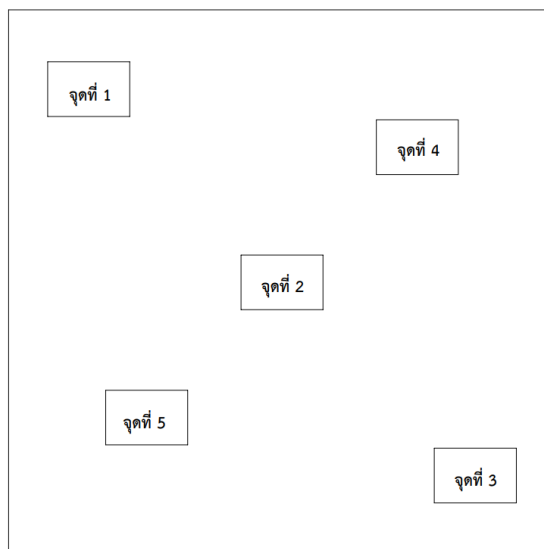


- ไซเหล็กกล่องชุบกับลวไนซ์  
1"



## ตารางการวัดความหยาบพิว

วัดความหยาบผิวตามมาตรฐานวิธีวัดแบบ Ra มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



รูปที่ ข.1 การวัดความหยابผิว 5 จุด

ตารางที่ ข.1 ตารางผลการวัดความหยาบผิวในหน่วยไมโครเมตร

| ตัวอย่าง  | ค่าความหนาแน่น |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |      |       |       | เฉลี่ย | STD | Error Bar |
|-----------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|-------|-------|--------|-----|-----------|
|           | จุดที่ 1       |            |            | จุดที่ 2   |            |            | จุดที่ 3   |            |            | จุดที่ 4   |            |            | จุดที่ 5   |            |            |      |       |       |        |     |           |
|           | ครั้งที่ 1     | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |      |       |       |        |     |           |
| 1         | 1.82           | 1.8        | 1.83       | 1.72       | 1.74       | 1.75       | 1.6        | 1.62       | 1.64       | 1.86       | 1.88       | 1.89       | 1.77       | 1.79       | 1.81       | 1.77 | 0.088 | 0.049 |        |     |           |
| 2         | 3.27           | 3.29       | 3.3        | 4.45       | 4.48       | 4.43       | 3.88       | 3.82       | 3.77       | 3.96       | 4.01       | 3.9        | 4.26       | 4.16       | 4.14       | 3.94 | 0.381 | 0.211 |        |     |           |
| 3         | 6.23           | 6.18       | 6.17       | 3.14       | 3.12       | 3.1        | 4.75       | 4.7        | 4.7        | 3.64       | 3.54       | 3.66       | 4.1        | 4.11       | 4.09       | 4.35 | 1.030 | 0.570 |        |     |           |
| 4         | 6.23           | 6.18       | 6.14       | 7.43       | 7.41       | 7.38       | 3.67       | 3.68       | 3.68       | 5.35       | 5.3        | 5.38       | 8.1        | 8.13       | 8.15       | 6.15 | 1.520 | 0.840 |        |     |           |
| n         | 15             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |      |       |       |        |     |           |
| t ที่ 95% | 2.145          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |      |       |       |        |     |           |

ตารางที่ ข.2 ตารางผลการวัดความหนาแน่นผิวไร่หน่วย e/L ( $\times 10^{-5}$ )

| ตัวอย่าง  | ค่าความหยาบผิว |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |       |       |       | เฉลี่ย | STD | Error Bar |
|-----------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|-------|--------|-----|-----------|
|           | จุดที่ 1       |            |            | จุดที่ 2   |            |            | จุดที่ 3   |            |            | จุดที่ 4   |            |            | จุดที่ 5   |            |            |       |       |       |        |     |           |
|           | ครั้งที่ 1     | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |       |       |       |        |     |           |
| 1         | 0.91           | 0.9        | 0.92       | 0.86       | 0.87       | 0.88       | 0.8        | 0.81       | 0.82       | 0.93       | 0.94       | 0.95       | 0.89       | 0.9        | 0.91       | 0.884 | 0.044 | 0.024 |        |     |           |
| 2         | 1.64           | 1.65       | 1.65       | 2.23       | 2.24       | 2.22       | 1.94       | 1.91       | 1.89       | 1.98       | 2.01       | 1.95       | 2.13       | 2.08       | 2.07       | 1.97  | 0.197 | 0.109 |        |     |           |
| 3         | 3.12           | 3.09       | 3.09       | 1.57       | 1.56       | 1.55       | 2.38       | 2.35       | 2.35       | 1.82       | 1.77       | 1.83       | 2.05       | 2.06       | 2.05       | 2.17  | 0.532 | 0.294 |        |     |           |
| 4         | 3.12           | 3.09       | 3.07       | 3.72       | 3.71       | 3.69       | 1.84       | 1.84       | 1.84       | 2.68       | 2.65       | 2.69       | 4.05       | 4.07       | 4.08       | 3.07  | 0.783 | 0.434 |        |     |           |
| n         | 15             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |       |       |       |        |     |           |
| t ที่ 95% | 2.145          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |       |       |       |        |     |           |

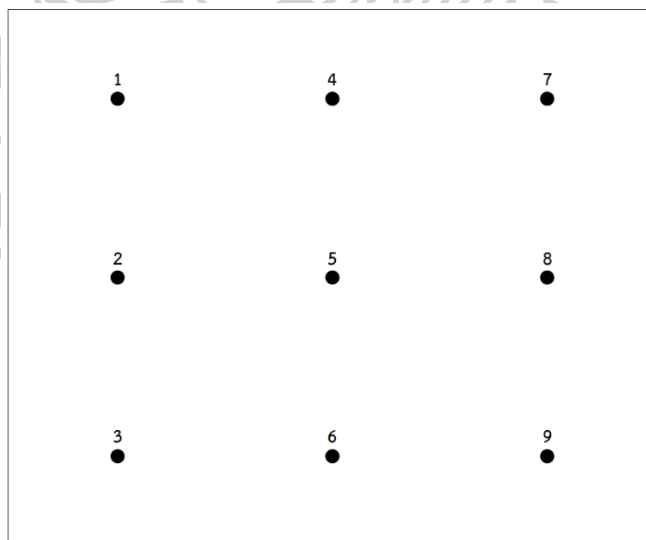


ตารางที่ ข.4 ตารางผลการวัดความกว้างการไหลของน้ำ

| Flow Rate (g/s) | แผ่นหยาบ 0.884             |       |           | แผ่นหยาบ 1.97              |       |           | แผ่นหยาบ 2.17              |       |           | แผ่นหยาบ 3.07              |       |           |
|-----------------|----------------------------|-------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------------------|-------|-----------|
|                 | ความกว้างการไหลของน้ำ (mm) |       |           | ความกว้างการไหลของน้ำ (mm) |       |           | ความกว้างการไหลของน้ำ (mm) |       |           | ความกว้างการไหลของน้ำ (mm) |       |           |
|                 | เฉลี่ย                     | SD    | Error Bar | เฉลี่ย                     | SD    | Error Bar | เฉลี่ย                     | SD    | Error Bar | เฉลี่ย                     | SD    | Error Bar |
| 0.1             | 25.28                      | 5.569 | 4.281     | 28.34                      | 5.373 | 4.13      | 31.28                      | 5.472 | 4.206     | 38.97                      | 6.299 | 4.842     |
| 0.16            | 28.95                      | 5.89  | 4.527     | 33.78                      | 7.608 | 5.848     | 39.78                      | 10.22 | 7.856     | 46.93                      | 10.14 | 7.797     |
| 1               | 53.76                      | 4.439 | 3.412     | 56.94                      | 5.272 | 4.052     | 60.32                      | 3.991 | 3.068     | 66.62                      | 6.859 | 5.272     |
| 2               | 61.46                      | 5.808 | 4.465     | 66.4                       | 8.608 | 6.617     | 70.75                      | 10.04 | 7.714     | 76.47                      | 12.31 | 9.466     |
| 4.5             | 66.19                      | 7.192 | 5.528     | 69.25                      | 7.763 | 5.967     | 71.49                      | 8.412 | 6.466     | 77.66                      | 9.781 | 7.518     |
| 10              | 68.35                      | 7.04  | 5.411     | 71.31                      | 7.571 | 5.82      | 74.19                      | 8.389 | 6.449     | 80.68                      | 10.21 | 7.844     |
| n               | 3                          |       |           |                            |       |           |                            |       |           |                            |       |           |
| t ที่ 95%       | 4.303                      |       |           |                            |       |           |                            |       |           |                            |       |           |

## การวัดความเร็ว, อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

การวัดความเร็ว, อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ใช้วิธีวัด 9 จุด ตามมาตรฐาน EN12599 ตามรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 การวัดความเร็วอากาศ 9 จุดตามมาตรฐาน EN12599





|                     |              |          | จุดที่ |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
|---------------------|--------------|----------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
|                     |              |          | 1      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | เฉลี่ย |
| ความเร็วอากาศ (m/s) |              |          | 0.31   | 0.27 | 0.25 | 0.17 | 0.18 | 0.26 | 0.30 | 0.35 | 0.38 | 0.27   |
| ครั้งที่<br>1       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.2   | 31.9 | 31.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.6 | 31.8 | 31.8 | 31.97  |
|                     |              | ความชื้น | 64.3   | 64.4 | 64.5 | 64.3 | 64.2 | 64.2 | 64.4 | 64.3 | 64.3 | 64.3   |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.4   | 28.3 | 28.3 | 28.3 | 28.1 | 27.9 | 28   | 27.7 | 27.4 | 28.04  |
|                     |              | ความชื้น | 90.0   | 89.9 | 89.9 | 89.6 | 89.6 | 89.7 | 89.8 | 89.8 | 89.8 | 89.8   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.5   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>2       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.8   | 32.8 | 32.7 | 32.2 | 32.1 | 31.9 | 31.6 | 31.8 | 31.8 | 32.19  |
|                     |              | ความชื้น | 63     | 63.2 | 63   | 63   | 62.9 | 62.9 | 62.9 | 62.9 | 63   | 63     |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.5   | 28.1 | 27.9 | 28.1 | 27.8 | 27.6 | 28   | 27.7 | 27.4 | 27.9   |
|                     |              | ความชื้น | 88.8   | 88.7 | 88.8 | 88.8 | 88.6 | 88.6 | 88.5 | 88.8 | 88.8 | 88.7   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.5   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>3       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.8   | 32.8 | 32.7 | 32.4 | 32.3 | 32   | 31.8 | 31.9 | 32.3 | 32.33  |
|                     |              | ความชื้น | 63.1   | 63.1 | 63.0 | 63.0 | 63   | 62.9 | 63   | 63   | 63   | 63     |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.5   | 28.2 | 27.9 | 28.2 | 27.9 | 27.6 | 28.1 | 27.7 | 27.5 | 27.96  |
|                     |              | ความชื้น | 91     | 91.1 | 91.1 | 91.4 | 91.4 | 91.3 | 91.2 | 91.2 | 91.2 | 91.2   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.4   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>4       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.3   | 32.3 | 32.1 | 32   | 32.3 | 32.2 | 31.8 | 31.9 | 32.3 | 32.13  |
|                     |              | ความชื้น | 63.4   | 63.3 | 63.3 | 63   | 63   | 63.1 | 63.2 | 63.2 | 63.1 | 63.2   |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.4   | 27.9 | 27.7 | 28.2 | 27.9 | 27.6 | 28.1 | 27.7 | 27.5 | 27.89  |
|                     |              | ความชื้น | 90.3   | 90.3 | 90.4 | 90.4 | 90.2 | 90.3 | 90.3 | 90.4 | 90.3 | 90.3   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.2   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>5       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.3   | 32.3 | 32.1 | 32.7 | 32.7 | 32.7 | 32.3 | 32.4 | 32.6 | 32.46  |
|                     |              | ความชื้น | 62.2   | 62.1 | 62.3 | 61.8 | 62   | 62   | 61.8 | 62   | 62   | 62     |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.2   | 27.9 | 27.7 | 28.5 | 28.3 | 27.7 | 28.3 | 27.7 | 27.5 | 27.98  |
|                     |              | ความชื้น | 89.8   | 89.9 | 90   | 90.1 | 89.6 | 89.6 | 89.5 | 89.8 | 89.8 | 89.8   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.2   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>6       | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.5   | 32.5 | 32.4 | 32.7 | 32.7 | 32.7 | 32.3 | 32.4 | 32.4 | 32.51  |
|                     |              | ความชื้น | 63     | 62.8 | 62.8 | 63.2 | 63.1 | 63.1 | 63   | 63.1 | 63   | 63     |
|                     | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.6   | 28.4 | 28.1 | 28.5 | 28.3 | 27.7 | 28.3 | 27.7 | 27.5 | 28.12  |
|                     |              | ความชื้น | 91.4   | 91.3 | 91.3 | 91.2 | 91.3 | 91.4 | 91.5 | 91.2 | 91.2 | 91.3   |
|                     | อุณหภูมิน้ำ  |          | 26.3   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |



























|               |              |          | จุดที่ |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
|---------------|--------------|----------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
|               |              |          | 1      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | เฉลี่ย |
| ความเร็วอากาศ |              |          | 0.23   | 0.27 | 0.29 | 0.17 | 0.17 | 0.28 | 0.30 | 0.31 | 0.32 | 0.27   |
| ครั้งที่<br>1 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 31.5   | 31.5 | 31.4 | 31.5 | 31.5 | 31.6 | 31.6 | 31.5 | 31.6 | 31.52  |
|               |              | ความชื้น | 62.1   | 62.2 | 62.2 | 62.3 | 62.2 | 62.3 | 62   | 62.3 | 62.4 | 62.2   |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 27.3   | 27.2 | 27.1 | 27.3 | 27.2 | 26.8 | 27.1 | 27.1 | 27   | 27.12  |
|               |              | ความชื้น | 88.5   | 88.6 | 88.6 | 88.2 | 88.2 | 88.4 | 88.4 | 88.5 | 88.4 | 88.4   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25     |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>2 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 31.7   | 31.4 | 31.6 | 31.2 | 31.3 | 31.4 | 31.6 | 31.4 | 31.7 | 31.48  |
|               |              | ความชื้น | 64     | 64   | 64.1 | 64   | 64.3 | 64.3 | 64.2 | 64.1 | 64.1 | 64.1   |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 27.2   | 27.1 | 27   | 27.3 | 27.1 | 26.7 | 27.1 | 26.9 | 27   | 27.04  |
|               |              | ความชื้น | 88.4   | 88.5 | 88.5 | 88.5 | 88.6 | 88.3 | 88.5 | 88.5 | 88.5 | 88.5   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25.9   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>3 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 32.6   | 32.6 | 32.6 | 32.8 | 32.8 | 32.8 | 33   | 32.9 | 32.9 | 32.78  |
|               |              | ความชื้น | 55     | 55.2 | 55.2 | 55.3 | 55.1 | 55.1 | 55.2 | 55.2 | 55.2 | 55.2   |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.2   | 28.3 | 27.3 | 28   | 27.5 | 26.8 | 28   | 27.5 | 27.3 | 27.66  |
|               |              | ความชื้น | 84.4   | 84.2 | 84.2 | 84.3 | 84.3 | 84.5 | 84.2 | 84.3 | 84.3 | 84.3   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25.8   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>4 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 33.2   | 33.1 | 33.1 | 33.2 | 33.2 | 33.3 | 33.4 | 33.4 | 33.5 | 33.27  |
|               |              | ความชื้น | 53.5   | 53.5 | 53.5 | 53.4 | 53.4 | 53.4 | 53.4 | 53.5 | 53.3 | 53.4   |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.4   | 27.8 | 27.5 | 28.2 | 27.6 | 27.1 | 28.6 | 28   | 27.8 | 27.89  |
|               |              | ความชื้น | 84.4   | 84.5 | 84.5 | 84.5 | 84.3 | 84.2 | 84.5 | 84.4 | 84.4 | 84.4   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25.7   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>5 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 33.1   | 33.1 | 33.1 | 33.1 | 33.1 | 33.1 | 33.2 | 33.1 | 33.3 | 33.13  |
|               |              | ความชื้น | 63.4   | 63.5 | 63.5 | 63.6 | 63.5 | 63.5 | 63.4 | 63.5 | 63.5 | 63.5   |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.9   | 28.8 | 28.3 | 28.5 | 28.2 | 28   | 28.6 | 28.4 | 28.2 | 28.43  |
|               |              | ความชื้น | 88.7   | 88.6 | 88.6 | 88.8 | 88.7 | 88.5 | 88.4 | 89   | 88.7 | 88.7   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25.6   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| ครั้งที่<br>6 | ด้าน<br>เข้า | อุณหภูมิ | 33.2   | 33   | 33   | 33.1 | 33.1 | 33.2 | 33.1 | 33.1 | 33.2 | 33.11  |
|               |              | ความชื้น | 64     | 64.2 | 64.1 | 63.7 | 63.5 | 64.5 | 64   | 64.2 | 64   | 64     |
|               | ด้าน<br>ออก  | อุณหภูมิ | 28.8   | 28.5 | 28.2 | 28.5 | 28.1 | 27.9 | 28.6 | 28.1 | 28   | 28.30  |
|               |              | ความชื้น | 89.8   | 89.6 | 89.7 | 89.4 | 89.5 | 89.5 | 89.3 | 89.3 | 89.5 | 89.5   |
|               | อุณหภูมิน้ำ  |          | 25.6   |      |      |      |      |      |      |      |      |        |



























**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีแผ่นเรียบ**

ตารางที่ ข.35 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.40             | 4.05                                                        | 11.35                                                                 |
| 2        | 0.44             | 4.51                                                        | 12.62                                                                 |
| 3        | 0.47             | 4.97                                                        | 13.90                                                                 |
| 4        | 0.46             | 4.76                                                        | 13.33                                                                 |
| 5        | 0.47             | 4.97                                                        | 13.91                                                                 |
| 6        | 0.48             | 5.10                                                        | 14.28                                                                 |

ตารางที่ ข.36 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.70             | 9.69                                                        | 27.13                                                                 |
| 2        | 0.69             | 9.40                                                        | 26.31                                                                 |
| 3        | 0.71             | 9.94                                                        | 27.83                                                                 |
| 4        | 0.71             | 9.92                                                        | 27.78                                                                 |
| 5        | 0.63             | 8.01                                                        | 22.42                                                                 |
| 6        | 0.71             | 9.94                                                        | 27.82                                                                 |

ตารางที่ ข.37 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.66             | 8.75                                                        | 24.49                                                                 |
| 2        | 0.72             | 10.27                                                       | 28.76                                                                 |
| 3        | 0.73             | 10.55                                                       | 29.53                                                                 |
| 4        | 0.72             | 10.25                                                       | 28.71                                                                 |
| 5        | 0.70             | 9.94                                                        | 27.82                                                                 |
| 6        | 0.70             | 9.69                                                        | 27.14                                                                 |

ตารางที่ ข.38 ประสิทธิภาพลุ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลุ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.69               | 9.46                                                    | 26.49                                                             |
| 2        | 0.70               | 9.94                                                    | 27.84                                                             |
| 3        | 0.70               | 9.93                                                    | 27.81                                                             |
| 4        | 0.72               | 10.30                                                   | 28.84                                                             |
| 5        | 0.72               | 10.40                                                   | 29.13                                                             |
| 6        | 0.70               | 9.86                                                    | 27.61                                                             |

ตารางที่ ข.39 ประสิทธิภาพลุ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลุ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.67               | 9.69                                                    | 27.13                                                             |
| 2        | 0.70               | 10.45                                                   | 29.25                                                             |
| 3        | 0.70               | 10.46                                                   | 29.30                                                             |
| 4        | 0.74               | 11.73                                                   | 32.84                                                             |
| 5        | 0.74               | 11.86                                                   | 33.21                                                             |
| 6        | 0.73               | 11.43                                                   | 31.99                                                             |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีผิวหยาบ e/L 0.884**

ตารางที่ ข.40 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 0.884 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.48             | 5.64                                                        | 15.78                                                                    |
| 2        | 0.50             | 5.85                                                        | 16.39                                                                    |
| 3        | 0.55             | 6.75                                                        | 18.91                                                                    |
| 4        | 0.55             | 6.73                                                        | 18.85                                                                    |
| 5        | 0.55             | 6.82                                                        | 19.10                                                                    |
| 6        | 0.51             | 6.04                                                        | 16.91                                                                    |

ตารางที่ ข.41 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 0.884 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.68             | 9.62                                                        | 26.94                                                                    |
| 2        | 0.68             | 9.73                                                        | 27.25                                                                    |
| 3        | 0.68             | 9.78                                                        | 27.38                                                                    |
| 4        | 0.73             | 11.01                                                       | 30.84                                                                    |
| 5        | 0.73             | 11.19                                                       | 31.33                                                                    |
| 6        | 0.72             | 10.86                                                       | 30.40                                                                    |

ตารางที่ ข.42 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 0.884 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.70             | 10.25                                                       | 28.71                                                                    |
| 2        | 0.68             | 9.90                                                        | 27.72                                                                    |
| 3        | 0.71             | 10.49                                                       | 29.37                                                                    |
| 4        | 0.70             | 10.25                                                       | 28.70                                                                    |
| 5        | 0.70             | 10.32                                                       | 28.90                                                                    |
| 6        | 0.70             | 10.39                                                       | 29.08                                                                    |

ตารางที่ ข.43 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L \ 0.884 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.71               | 10.64                                                   | 29.78                                                             |
| 2        | 0.71               | 10.53                                                   | 29.48                                                             |
| 3        | 0.72               | 10.94                                                   | 30.63                                                             |
| 4        | 0.73               | 11.06                                                   | 30.97                                                             |
| 5        | 0.71               | 10.73                                                   | 30.06                                                             |
| 6        | 0.70               | 10.42                                                   | 29.18                                                             |

ตารางที่ ข.44 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L \ 0.884 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.71               | 10.34                                                   | 28.95                                                             |
| 2        | 0.72               | 10.72                                                   | 30.01                                                             |
| 3        | 0.72               | 10.54                                                   | 29.52                                                             |
| 4        | 0.73               | 10.87                                                   | 30.45                                                             |
| 5        | 0.71               | 10.25                                                   | 28.71                                                             |
| 6        | 0.71               | 10.34                                                   | 28.96                                                             |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีผิวหยาบ e/L 1.97**

ตารางที่ ข.45 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 1.97 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.53             | 5.85                                                        | 16.38                                                                    |
| 2        | 0.53             | 5.92                                                        | 16.57                                                                    |
| 3        | 0.54             | 6.00                                                        | 16.79                                                                    |
| 4        | 0.52             | 5.77                                                        | 16.17                                                                    |
| 5        | 0.52             | 5.65                                                        | 15.82                                                                    |
| 6        | 0.53             | 5.86                                                        | 16.40                                                                    |

ตารางที่ ข.46 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 1.97 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.69             | 9.22                                                        | 25.82                                                                    |
| 2        | 0.72             | 9.85                                                        | 27.59                                                                    |
| 3        | 0.74             | 10.64                                                       | 29.80                                                                    |
| 4        | 0.73             | 10.27                                                       | 28.76                                                                    |
| 5        | 0.73             | 10.23                                                       | 28.65                                                                    |
| 6        | 0.75             | 10.76                                                       | 30.13                                                                    |

ตารางที่ ข.47 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 1.97 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.72             | 9.32                                                        | 26.08                                                                    |
| 2        | 0.70             | 8.88                                                        | 24.87                                                                    |
| 3        | 0.73             | 9.56                                                        | 26.76                                                                    |
| 4        | 0.71             | 9.11                                                        | 25.52                                                                    |
| 5        | 0.74             | 9.73                                                        | 27.25                                                                    |
| 6        | 0.73             | 9.66                                                        | 27.05                                                                    |

ตารางที่ ข.48 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพรีซีผิวหยาบ  $e/L$   $1.97 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.73               | 9.81                                                    | 27.47                                                             |
| 2        | 0.70               | 8.93                                                    | 25.00                                                             |
| 3        | 0.73               | 9.88                                                    | 27.66                                                             |
| 4        | 0.74               | 9.96                                                    | 27.90                                                             |
| 5        | 0.73               | 9.68                                                    | 27.09                                                             |
| 6        | 0.73               | 9.81                                                    | 27.47                                                             |

ตารางที่ ข.49 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพรีซีผิวหยาบ  $e/L$   $1.97 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.72               | 9.80                                                    | 27.44                                                             |
| 2        | 0.73               | 10.18                                                   | 28.51                                                             |
| 3        | 0.74               | 10.44                                                   | 29.23                                                             |
| 4        | 0.72               | 9.84                                                    | 27.57                                                             |
| 5        | 0.73               | 10.17                                                   | 28.47                                                             |
| 6        | 0.71               | 9.66                                                    | 27.04                                                             |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีผิวหยาบ e/L 2.17**

ตารางที่ ข.50 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 2.17 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.57             | 7.24                                                        | 20.27                                                                    |
| 2        | 0.59             | 7.64                                                        | 21.39                                                                    |
| 3        | 0.60             | 7.85                                                        | 21.99                                                                    |
| 4        | 0.62             | 8.28                                                        | 23.19                                                                    |
| 5        | 0.64             | 8.68                                                        | 24.31                                                                    |
| 6        | 0.61             | 8.19                                                        | 22.94                                                                    |

ตารางที่ ข.51 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 2.17 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.72             | 10.57                                                       | 29.61                                                                    |
| 2        | 0.79             | 10.12                                                       | 28.34                                                                    |
| 3        | 0.68             | 9.81                                                        | 27.47                                                                    |
| 4        | 0.68             | 11.09                                                       | 31.06                                                                    |
| 5        | 0.75             | 10.01                                                       | 28.02                                                                    |
| 6        | 0.79             | 10.82                                                       | 30.31                                                                    |

ตารางที่ ข.52 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 2.17 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74             | 11.07                                                       | 31.01                                                                    |
| 2        | 0.75             | 11.18                                                       | 31.30                                                                    |
| 3        | 0.77             | 11.91                                                       | 33.34                                                                    |
| 4        | 0.75             | 11.34                                                       | 31.76                                                                    |
| 5        | 0.79             | 12.88                                                       | 36.07                                                                    |
| 6        | 0.77             | 11.90                                                       | 33.33                                                                    |

ตารางที่ ข.53 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L \ 2.17 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74               | 11.23                                                   | 31.45                                                             |
| 2        | 0.75               | 11.43                                                   | 32.01                                                             |
| 3        | 0.78               | 12.49                                                   | 34.97                                                             |
| 4        | 0.76               | 11.98                                                   | 33.54                                                             |
| 5        | 0.77               | 12.22                                                   | 34.20                                                             |
| 6        | 0.77               | 12.40                                                   | 34.73                                                             |

ตารางที่ ข.54 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L \ 2.17 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74               | 10.42                                                   | 29.16                                                             |
| 2        | 0.74               | 10.14                                                   | 28.39                                                             |
| 3        | 0.77               | 11.07                                                   | 31.01                                                             |
| 4        | 0.76               | 11.00                                                   | 30.81                                                             |
| 5        | 0.78               | 11.52                                                   | 32.26                                                             |
| 6        | 0.79               | 11.89                                                   | 33.29                                                             |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีผิวหยาบ e/L 3.07**

ตารางที่ ข.55 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.58             | 6.88                                                        | 29.26                                                                    |
| 2        | 0.60             | 7.23                                                        | 20.26                                                                    |
| 3        | 0.63             | 7.86                                                        | 22.01                                                                    |
| 4        | 0.64             | 8.05                                                        | 22.54                                                                    |
| 5        | 0.63             | 7.91                                                        | 22.15                                                                    |
| 6        | 0.60             | 7.36                                                        | 20.60                                                                    |

ตารางที่ ข.56 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74             | 10.57                                                       | 29.60                                                                    |
| 2        | 0.77             | 11.61                                                       | 32.50                                                                    |
| 3        | 0.77             | 11.67                                                       | 32.67                                                                    |
| 4        | 0.81             | 13.06                                                       | 36.56                                                                    |
| 5        | 0.81             | 13.01                                                       | 36.43                                                                    |
| 6        | 0.82             | 13.34                                                       | 37.36                                                                    |

ตารางที่ ข.57 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณภาพพื้นที่ผิวสัมผัสพีวีซีผิวหยาบ  $e/L 3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณภาพพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.78             | 11.47                                                       | 32.11                                                                    |
| 2        | 0.78             | 11.54                                                       | 32.31                                                                    |
| 3        | 0.78             | 11.63                                                       | 32.56                                                                    |
| 4        | 0.78             | 11.65                                                       | 32.62                                                                    |
| 5        | 0.78             | 11.60                                                       | 32.49                                                                    |
| 6        | 0.80             | 12.23                                                       | 34.24                                                                    |

ตารางที่ ข.58 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสวิธีหยาบ  $e/L \ 3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74               | 10.03                                                   | 28.07                                                             |
| 2        | 0.80               | 12.27                                                   | 34.36                                                             |
| 3        | 0.78               | 11.25                                                   | 31.51                                                             |
| 4        | 0.78               | 11.51                                                   | 32.24                                                             |
| 5        | 0.79               | 11.83                                                   | 33.12                                                             |
| 6        | 0.81               | 12.54                                                   | 35.11                                                             |

ตารางที่ ข.59 ประสิทธิภาพลิ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสวิธีหยาบ  $e/L \ 3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลิ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.77               | 10.73                                                   | 30.02                                                             |
| 2        | 0.77               | 10.79                                                   | 30.22                                                             |
| 3        | 0.77               | 10.84                                                   | 30.35                                                             |
| 4        | 0.77               | 10.82                                                   | 30.28                                                             |
| 5        | 0.78               | 11.15                                                   | 31.23                                                             |
| 6        | 0.79               | 11.51                                                   | 32.21                                                             |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
พื้นที่ผิวสัมผัสของพีวีซีผิวเชิงการค้าเซลลูโลส**

ตารางที่ ข.60 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกผิวเชิงการค้า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.70             | 5.37                                                        | 26.67                                                                 |
| 2        | 0.71             | 5.64                                                        | 28.00                                                                 |
| 3        | 0.76             | 6.37                                                        | 31.65                                                                 |
| 4        | 0.74             | 6.00                                                        | 29.81                                                                 |
| 5        | 0.75             | 6.27                                                        | 31.14                                                                 |
| 6        | 0.75             | 6.12                                                        | 30.42                                                                 |

ตารางที่ ข.61 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกผิวเชิงการค้า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.74             | 5.95                                                        | 29.57                                                                 |
| 2        | 0.73             | 5.81                                                        | 28.86                                                                 |
| 3        | 0.80             | 7.21                                                        | 35.80                                                                 |
| 4        | 0.75             | 6.20                                                        | 30.82                                                                 |
| 5        | 0.75             | 6.31                                                        | 31.34                                                                 |
| 6        | 0.79             | 6.96                                                        | 34.60                                                                 |

ตารางที่ ข.62 ประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกผิวเชิงการค้า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิผลอิมตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณพื้นที่<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.73             | 6.13                                                        | 30.47                                                                 |
| 2        | 0.76             | 6.69                                                        | 33.22                                                                 |
| 3        | 0.73             | 6.10                                                        | 30.30                                                                 |
| 4        | 0.75             | 6.46                                                        | 32.09                                                                 |
| 5        | 0.77             | 7.01                                                        | 34.80                                                                 |
| 6        | 0.76             | 6.75                                                        | 33.55                                                                 |

ตารางที่ ข.63 ประสิทธิภาพลุ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณสมบัติผิวสัมผัสของผิวเปียกผิวเชิงการค้า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลุ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณสมบัติ<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.73               | 5.51                                                        | 27.35                                                                |
| 2        | 0.75               | 5.77                                                        | 28.68                                                                |
| 3        | 0.76               | 5.89                                                        | 29.25                                                                |
| 4        | 0.76               | 5.96                                                        | 29.60                                                                |
| 5        | 0.76               | 6.00                                                        | 29.83                                                                |
| 6        | 0.77               | 6.17                                                        | 30.64                                                                |

ตารางที่ ข.64 ประสิทธิภาพลุ่มตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ร้อนคุณสมบัติผิวสัมผัสของผิวเปียกผิวเชิงการค้า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพลุ่มตัว | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัดต่อตาราง<br>เมตรองศาเซลเซียส) | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคุณสมบัติ<br>ผิวสัมผัส (วัดต่อองศาเซลเซียส) |
|----------|--------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.75               | 5.92                                                        | 29.42                                                                |
| 2        | 0.75               | 5.99                                                        | 29.77                                                                |
| 3        | 0.74               | 5.86                                                        | 29.10                                                                |
| 4        | 0.76               | 6.20                                                        | 30.78                                                                |
| 5        | 0.76               | 6.11                                                        | 30.33                                                                |
| 6        | 0.76               | 6.09                                                        | 30.26                                                                |

**ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส**

ตารางที่ ข.65 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเรียบ

| อัตราการไหล<br>ของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผล<br>อิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การ<br>พาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>คูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|------------------------------|----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|-----------|
| 0.2                          | 0.45                 | 0.0268    | 4.73                          | 0.3734    | 13.23                                            | 1.0455    |
| 0.3                          | 0.69                 | 0.0291    | 9.48                          | 0.7208    | 26.55                                            | 2.0182    |
| 0.4                          | 0.70                 | 0.0234    | 9.911                         | 0.6147    | 27.74                                            | 1.7211    |
| 0.5                          | 0.70                 | 0.0117    | 9.98                          | 0.3236    | 27.95                                            | 0.9060    |
| 0.6                          | 0.71                 | 0.0272    | 10.94                         | 0.8295    | 30.62                                            | 2.3227    |
| n                            | 6                    |           |                               |           |                                                  |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%       | 2.571                |           |                               |           |                                                  |           |

ตารางที่ ข.66 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวหยาบ  $e/L 0.884 \times 10^{-5}$

| อัตราการไหล<br>ของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผล<br>อิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การ<br>พาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>คูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|------------------------------|----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|-----------|
| 0.2                          | 0.52                 | 0.0284    | 6.31                          | 0.5017    | 17.66                                            | 1.4048    |
| 0.3                          | 0.70                 | 0.0244    | 10.37                         | 0.6966    | 29.02                                            | 1.9504    |
| 0.4                          | 0.70                 | 0.0070    | 10.27                         | 0.1922    | 28.75                                            | 0.5380    |
| 0.5                          | 0.71                 | 0.0079    | 10.72                         | 0.2336    | 30.02                                            | 0.6541    |
| 0.6                          | 0.71                 | 0.0076    | 10.51                         | 0.2346    | 29.43                                            | 0.6569    |
| n                            | 6                    |           |                               |           |                                                  |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%       | 2.571                |           |                               |           |                                                  |           |

ตารางที่ ข.67 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวหยาบ  $e/L 1.97 \times 10^{-5}$

| อัตราการไหล<br>ของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผล<br>อิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การ<br>พาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน<br>คูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|------------------------------|----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|-----------|
| 0.2                          | 0.53                 | 0.0069    | 5.84                          | 0.1141    | 16.35                                            | 0.3194    |
| 0.3                          | 0.73                 | 0.0192    | 10.16                         | 0.5393    | 28.46                                            | 1.5101    |
| 0.4                          | 0.72                 | 0.0122    | 9.38                          | 0.3204    | 26.26                                            | 0.8971    |
| 0.5                          | 0.73                 | 0.0140    | 9.68                          | 0.3631    | 27.10                                            | 1.0166    |
| 0.6                          | 0.73                 | 0.0098    | 10.02                         | 0.2829    | 28.04                                            | 0.7922    |
| n                            | 6                    |           |                               |           |                                                  |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%       | 2.571                |           |                               |           |                                                  |           |

ตารางที่ ข.68 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวหยาบ  $e/L \ 2.17 \times 10^{-5}$

| อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผลอิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|--------------------------|------------------|-----------|---------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------|
| 0.2                      | 0.60             | 0.0229    | 7.98                      | 0.4904    | 22.35                                        | 1.3731    |
| 0.3                      | 0.74             | 0.0163    | 10.40                     | 0.4826    | 29.13                                        | 1.3514    |
| 0.4                      | 0.76             | 0.0184    | 11.71                     | 0.6454    | 32.80                                        | 1.9337    |
| 0.5                      | 0.76             | 0.0148    | 11.96                     | 0.4980    | 33.48                                        | 1.3944    |
| 0.6                      | 0.76             | 0.0199    | 11.01                     | 0.6277    | 30.82                                        | 1.7576    |
| n                        | 6                |           |                           |           |                                              |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%   | 2.571            |           |                           |           |                                              |           |

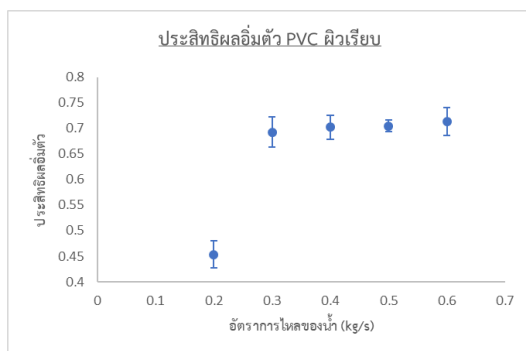
ตารางที่ ข.69 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวหยาบ  $e/L \ 3.07 \times 10^{-5}$

| อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผลอิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|--------------------------|------------------|-----------|---------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------|
| 0.2                      | 0.61             | 0.02169   | 7.55                      | 0.4416    | 21.14                                        | 1.2365    |
| 0.3                      | 0.79             | 0.02917   | 12.21                     | 1.0485    | 34.19                                        | 2.9357    |
| 0.4                      | 0.78             | 0.00728   | 11.69                     | 0.2629    | 32.72                                        | 0.7360    |
| 0.5                      | 0.78             | 0.02543   | 11.57                     | 0.8554    | 32.40                                        | 2.3953    |
| 0.6                      | 0.78             | 0.00887   | 10.97                     | 0.2884    | 30.72                                        | 0.8276    |
| n                        | 6                |           |                           |           |                                              |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%   | 2.571            |           |                           |           |                                              |           |

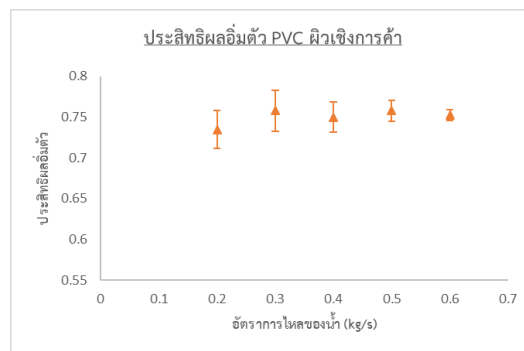
ตารางที่ ข.70 ตารางสรุปประสิทธิผลอิมตัว, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวเปียกเชิงการค้า

| อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) | ประสิทธิผลอิมตัว | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน | Error Bar | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคูณพื้นที่ผิวสัมผัส | Error Bar |
|--------------------------|------------------|-----------|---------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------|
| 0.2                      | 0.73             | 0.0232    | 5.96                      | 0.3703    | 29.61                                        | 1.8396    |
| 0.3                      | 0.76             | 0.0250    | 6.41                      | 0.5362    | 30.83                                        | 2.6638    |
| 0.4                      | 0.75             | 0.0185    | 6.52                      | 0.3448    | 32.41                                        | 1.7128    |
| 0.5                      | 0.76             | 0.0128    | 5.88                      | 0.2167    | 29.23                                        | 1.0766    |
| 0.6                      | 0.75             | 0.0067    | 6.03                      | 0.1210    | 29.95                                        | 0.6011    |
| n                        | 6                |           |                           |           |                                              |           |
| t ที่ความเชื่อมั่น 95%   | 2.571            |           |                           |           |                                              |           |

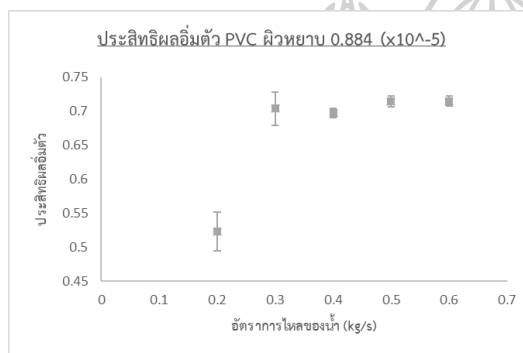
### กราฟผลการทดลองของผิวเปียกแต่ละตัวอย่าง



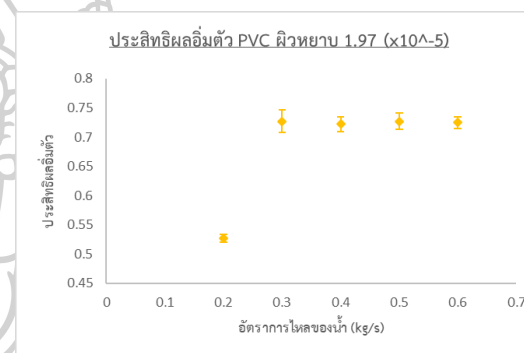
ก. ผิวเรียบ



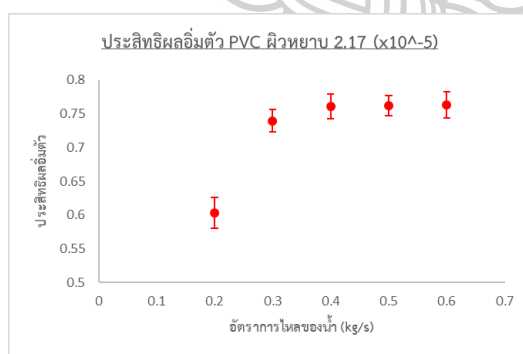
ข. ผิวเชิงการค้ำเซลลูโลส



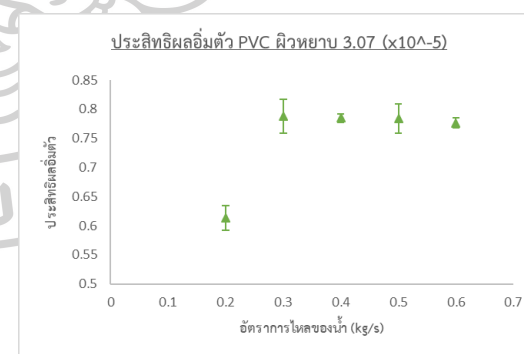
ค. ผิวหยาบ  $0.884 \times 10^{-5}$



ง. ผิวหยาบ  $1.97 \times 10^{-5}$

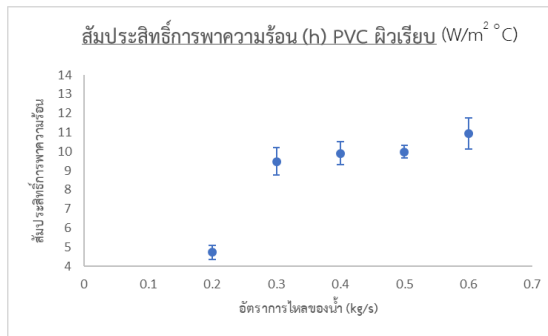


จ. ผิวหยาบ  $2.17 \times 10^{-5}$

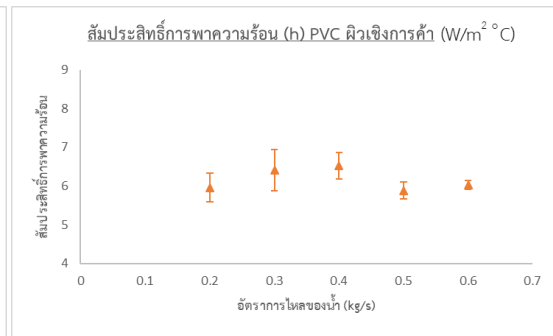


ฉ. ผิวหยาบ  $3.07 \times 10^{-5}$

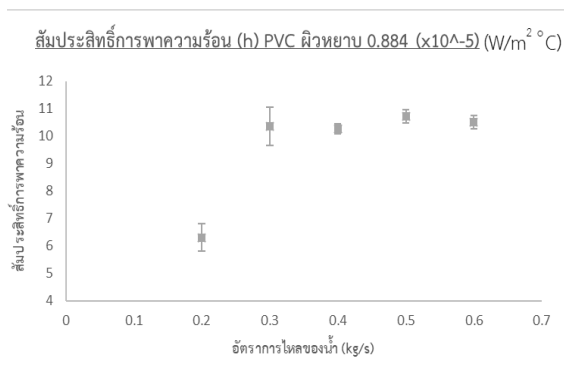
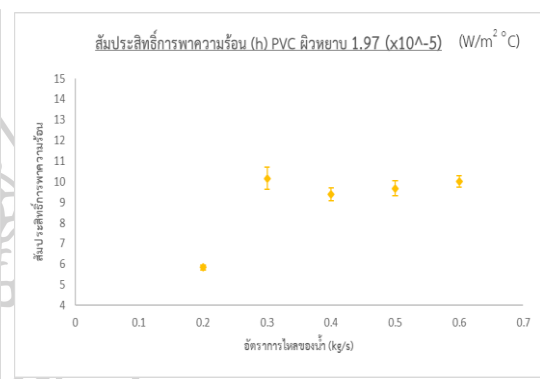
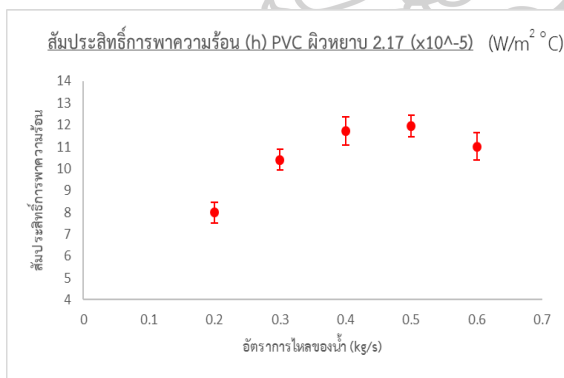
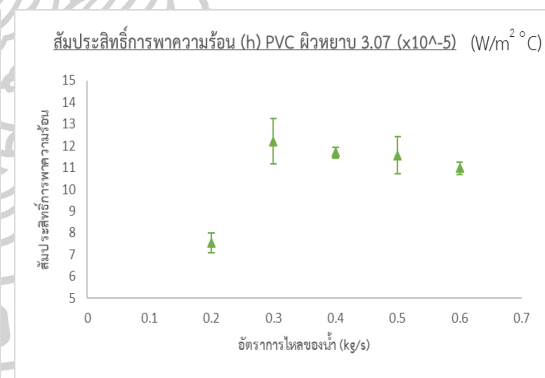
รูปที่ ข.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพลดอิมิตัวของผิวเปียกแต่ละตัวอย่าง



ก. ผิวเรียบ



ข. ผิวเชิงการค้าเซลลูโลส

ค. ผิวหยาบ  $0.884 \times 10^{-5}$ ง. ผิวหยาบ  $1.97 \times 10^{-5}$ จ. ผิวหยาบ  $2.17 \times 10^{-5}$ ฉ. ผิวหยาบ  $3.07 \times 10^{-5}$ 

รูปที่ ข.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิว  
เปียกแต่ละตัวอย่าง



### ตารางอุณหภูมิและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ตารางอุณหภูมิและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวเปียกพีวีซีแผ่นเรียบ

| เวลา (นาท) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|            | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0          | 28.2                     | 29.9                | 27.1                | 28.4                | 28.4                |
| 5          | 28.1                     | 29.2                | 26.9                | 28.1                | 28.2                |
| 10         | 28                       | 28.9                | 26.7                | 27.8                | 27.9                |
| 15         | 27.9                     | 28.7                | 26.5                | 27.4                | 27.7                |
| 20         | 27.8                     | 28.5                | 26.5                | 27.2                | 27.4                |
| 25         | 27.8                     | 28.3                | 26.5                | 27.1                | 27.2                |
| 30         | 27.7                     | 27.9                | 26.5                | 27                  | 27.1                |
| 35         | 27.6                     | 27.9                | 26.5                | 26.9                | 27                  |
| 40         | 27.5                     | 27.9                | 26.4                | 26.9                | 27                  |
| 45         | 27.4                     | 27.8                | 26.4                | 26.8                | 26.9                |
| 50         | 27.4                     | 27.7                | 26.4                | 26.8                | 26.9                |
| 55         | 27.3                     | 27.7                | 26.5                | 26.8                | 26.8                |
| 60         | 27.3                     | 27.7                | 26.5                | 26.7                | 26.7                |
| 65         | 27.3                     | 27.6                | 26.5                | 26.7                | 26.6                |
| 70         | 27.3                     | 27.6                | 26.5                | 26.6                | 26.6                |
| 75         | 27.2                     | 27.7                | 26.4                | 26.6                | 26.6                |
| 80         | 27.2                     | 27.7                | 26.4                | 26.5                | 26.6                |
| 85         | 27.2                     | 27.7                | 26.4                | 26.4                | 26.5                |
| 90         | 27.2                     | 26.7                | 26.4                | 26.4                | 26.5                |
| 95         | 27.1                     | 26.7                | 26.3                | 26.3                | 26.5                |
| 100        | 27.1                     | 26.7                | 26.3                | 26.3                | 26.4                |
| 105        | 27.1                     | 26.7                | 26.2                | 26.2                | 26.4                |
| 110        | 27.1                     | 26.7                | 26.2                | 26.2                | 26.4                |
| 115        | 27.1                     | 26.7                | 26.2                | 26.2                | 26.5                |
| 120        | 27.1                     | 26.8                | 26.2                | 26.2                | 26.6                |
| 125        | 27.1                     | 26.8                | 26.2                | 26.2                | 26.6                |
| 130        | 27.1                     | 26.7                | 26.2                | 26.2                | 26.5                |
| 135        | 27.1                     | 26.7                | 26.2                | 26.1                | 26.6                |
| 140        | 27.1                     | 26.8                | 26.2                | 26.1                | 26.6                |
| 145        | 27.1                     | 26.8                | 26.3                | 26.1                | 26.7                |
| 150        | 27.1                     | 26.8                | 26.3                | 26.1                | 26.8                |
| 155        | 27.1                     | 26.8                | 26.3                | 26.1                | 26.7                |
| 160        | 27.1                     | 26.8                | 26.2                | 26.1                | 26.7                |
| 165        | 27.1                     | 26.9                |                     | 26.2                | 26.7                |
| 170        | 27.1                     | 26.9                |                     | 26.2                | 26.8                |
| 175        | 27.1                     | 27                  |                     | 26.2                | 26.8                |
| 180        | 27.1                     | 27                  |                     | 26.2                | 26.8                |
| 185        | 27.1                     | 27                  |                     | 26.2                | 26.8                |
| 190        |                          | 27                  |                     |                     |                     |
| 195        |                          | 27                  |                     |                     |                     |
| 200        |                          | 27                  |                     |                     |                     |
| 205        |                          | 27                  |                     |                     |                     |
| 210        |                          | 27                  |                     |                     |                     |

หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.2 ตารางอุณหภูมิน้ำและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวหยาบ  $0.884 \times 10^{-5}$

| เวลา (นาท) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|            | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0          | 28.3                     | 26.5                | 29.6                | 27.1                | 28.2                |
| 5          | 28.2                     | 26.4                | 29.2                | 27.1                | 27.9                |
| 10         | 28.1                     | 26.3                | 28.9                | 27.1                | 27.7                |
| 15         | 28                       | 26.2                | 28.6                | 27.1                | 27.5                |
| 20         | 27.9                     | 26.2                | 28.4                | 27.1                | 27.3                |
| 25         | 27.7                     | 26.2                | 28.2                | 27.1                | 27.1                |
| 30         | 27.5                     | 26.1                | 28.1                | 27.1                | 27                  |
| 35         | 27.4                     | 26.1                | 28                  | 27                  | 26.9                |
| 40         | 27.3                     | 26.1                | 27.9                | 27                  | 26.8                |
| 45         | 27.2                     | 26                  | 27.8                | 27                  | 26.8                |
| 50         | 27.1                     | 26                  | 27.7                | 27                  | 26.7                |
| 55         | 27                       | 26                  | 27.6                | 27.1                | 26.7                |
| 60         | 27                       | 25.9                | 27.5                | 27.1                | 26.6                |
| 65         | 27                       | 25.9                | 27.5                | 27.1                | 26.6                |
| 70         | 27                       | 25.9                | 27.4                | 27.1                | 26.6                |
| 75         | 26.9                     | 25.9                | 27.4                | 27.1                | 26.6                |
| 80         | 26.9                     | 25.9                | 27.4                | 27                  | 26.6                |
| 85         | 26.9                     | 25.9                | 27.4                | 27                  | 26.5                |
| 90         | 26.9                     | 25.9                | 27.4                | 27                  | 26.5                |
| 95         | 26.9                     | 25.9                | 27.4                | 27                  | 26.5                |
| 100        | 26.8                     | 25.9                | 27.4                | 27                  | 26.5                |
| 105        | 26.8                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 110        | 26.8                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 115        | 26.8                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 120        | 26.8                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 125        | 26.7                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 130        | 26.7                     | 25.9                | 27.3                | 27                  | 26.5                |
| 135        | 26.7                     | 25.9                | 27.2                | 27.1                | 26.5                |
| 140        | 26.7                     | 25.9                | 27.2                | 27.1                | 26.4                |
| 145        | 26.7                     | 25.9                | 27.2                | 27.1                | 26.4                |
| 150        | 26.6                     | 25.9                | 27.2                | 27.1                | 26.4                |
| 155        | 26.6                     | 25.9                | 27.2                | 27.1                | 26.4                |
| 160        | 26.6                     | 25.9                | 27.1                |                     | 26.4                |
| 165        | 26.6                     |                     | 27.1                |                     | 26.4                |
| 170        | 26.6                     |                     | 27.1                |                     | 26.4                |
| 175        | 26.5                     |                     | 27.1                |                     | 26.4                |
| 180        | 26.5                     |                     | 27.1                |                     | 26.4                |
| 185        | 26.5                     |                     | 27.1                |                     |                     |
| 190        | 26.5                     |                     | 27.1                |                     |                     |
| 195        | 26.5                     |                     | 27.1                |                     |                     |
| 200        |                          |                     | 27.1                |                     |                     |
| 205        |                          |                     |                     |                     |                     |
| 210        |                          |                     |                     |                     |                     |

หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.3 ตารางอุณหภูมิน้ำและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวหยาบ  $1.97 \times 10^{-5}$

| เวลา (นาท) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|            | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0          | 29                       | 28.2                | 29                  | 30                  | 28.8                |
| 5          | 28.9                     | 28.2                | 28.9                | 29.8                | 28.5                |
| 10         | 28.9                     | 28.1                | 28.8                | 29.6                | 28.1                |
| 15         | 28.8                     | 28.1                | 28.8                | 29.3                | 28                  |
| 20         | 28.8                     | 28                  | 28.7                | 29                  | 27.9                |
| 25         | 28.7                     | 28                  | 28.6                | 28.8                | 27.9                |
| 30         | 28.5                     | 27.9                | 28.5                | 28.7                | 27.9                |
| 35         | 28.4                     | 27.9                | 28.5                | 28.4                | 27.8                |
| 40         | 28.2                     | 27.8                | 28.5                | 28.1                | 27.8                |
| 45         | 28.2                     | 27.7                | 28.4                | 28.1                | 27.7                |
| 50         | 28.1                     | 27.6                | 28.3                | 28                  | 27.5                |
| 55         | 28                       | 27.6                | 28.3                | 28                  | 27.3                |
| 60         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 28                  | 27.1                |
| 65         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 27.9                | 27.1                |
| 70         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 27.9                | 27.1                |
| 75         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 27.9                | 27.1                |
| 80         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 27.8                | 27.1                |
| 85         | 28                       | 27.5                | 28.2                | 27.8                | 27.1                |
| 90         | 28                       | 27.4                | 28.2                | 27.8                | 27.1                |
| 95         | 28                       | 27.4                | 28.2                | 27.8                | 27.1                |
| 100        | 28                       | 27.4                | 28.2                | 27.7                | 27.1                |
| 105        | 28                       | 27.4                | 28.1                | 27.6                | 27.1                |
| 110        | 28                       | 27.4                | 28.1                | 27.6                | 27.1                |
| 115        | 27.9                     | 27.4                | 28.1                | 27.5                | 27.1                |
| 120        | 27.9                     | 27.4                | 28.1                | 27.5                | 27.1                |
| 125        | 27.9                     | 27.3                | 28.1                | 27.5                | 27.1                |
| 130        | 27.9                     | 27.3                | 28.1                | 27.5                | 27.1                |
| 135        | 27.9                     | 27.3                | 28.1                | 27.4                | 27.1                |
| 140        | 27.9                     | 27.3                | 28.1                | 27.4                | 27.1                |
| 145        | 27.9                     | 27.3                | 28.1                | 27.4                | 27.1                |
| 150        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.3                | 27.1                |
| 155        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.3                | 27.1                |
| 160        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.3                | 27.1                |
| 165        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.3                | 27.1                |
| 170        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.2                | 27.1                |
| 175        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.2                | 27.1                |
| 180        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.2                | 27.1                |
| 185        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.1                | 27.1                |
| 190        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.1                | 27.1                |
| 195        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.1                | 27.1                |
| 200        | 27.8                     | 27.3                | 28.1                | 27.1                | 27.1                |
| 205        |                          |                     |                     |                     |                     |
| 210        |                          |                     |                     |                     |                     |

หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.4 ตารางอุณหภูมิน้ำและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวหยาบ  $2.17 \times 10^{-5}$

| เวลา (นาท) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|            | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0          | 29                       | 30.2                | 29.4                | 28.9                | 28                  |
| 5          | 28.5                     | 29.5                | 29                  | 28.3                | 27.5                |
| 10         | 28.3                     | 28.4                | 28.7                | 27.9                | 27.2                |
| 15         | 27.9                     | 27.8                | 28.3                | 27.8                | 27                  |
| 20         | 27.6                     | 27.2                | 28                  | 27.6                | 26.9                |
| 25         | 27.3                     | 26.9                | 27.7                | 27.5                | 26.8                |
| 30         | 27.2                     | 26.8                | 27.4                | 27.4                | 26.7                |
| 35         | 27.1                     | 26.5                | 27.1                | 27.2                | 26.6                |
| 40         | 27                       | 26.3                | 27.2                | 27.1                | 26.5                |
| 45         | 27                       | 26.1                | 27.1                | 27                  | 26.3                |
| 50         | 27                       | 26                  | 27                  | 27                  | 26.2                |
| 55         | 27                       | 26                  | 27.1                | 27                  | 26.2                |
| 60         | 27                       | 26                  | 27.1                | 27                  | 26.1                |
| 65         | 27                       | 26                  | 27                  | 27                  | 26.1                |
| 70         | 26.9                     | 26                  | 27                  | 27                  | 26.1                |
| 75         | 26.9                     | 25.9                | 26.9                | 27                  | 26                  |
| 80         | 26.9                     | 25.9                | 27                  | 26.9                | 26                  |
| 85         | 26.8                     | 25.8                | 27                  | 26.9                | 26.1                |
| 90         | 26.9                     | 25.8                | 26.9                | 26.8                | 26                  |
| 95         | 26.8                     | 25.9                | 26.9                | 27.3                | 26                  |
| 100        | 26.8                     | 25.9                | 26.8                | 27.1                | 26                  |
| 105        | 26.8                     | 25.9                | 26.8                | 27                  | 26                  |
| 110        | 26.8                     | 25.8                | 26.7                | 27                  | 26                  |
| 115        | 26.9                     | 25.8                | 26.7                | 27                  | 26                  |
| 120        | 26.9                     | 25.8                | 26.7                | 26.9                | 26                  |
| 125        | 26.9                     | 25.8                | 26.7                | 26.9                | 26                  |
| 130        | 26.9                     | 25.7                | 26.7                | 26.8                | 26                  |
| 135        | 26.8                     | 25.7                | 26.7                | 26.7                | 26.1                |
| 140        | 26.9                     | 25.7                | 26.8                | 26.7                | 26                  |
| 145        | 26.8                     | 25.7                | 26.7                | 26.6                | 26                  |
| 150        | 26.9                     | 25.7                | 26.8                | 26.5                | 26                  |
| 155        | 26.8                     | 25.7                | 26.9                | 26.4                | 26                  |
| 160        | 26.8                     | 25.7                | 26.8                | 26.3                | 26.1                |
| 165        | 26.8                     | 25.7                | 26.8                | 26.3                | 26.1                |
| 170        | 26.8                     | 25.7                | 26.8                | 26.2                | 26.1                |
| 175        | 26.8                     | 25.7                | 26.8                | 26.2                | 26.1                |
| 180        | 26.9                     | 25.6                | 26.9                | 26.2                | 26.2                |
| 185        |                          | 25.6                |                     | 26.1                |                     |
| 190        |                          | 25.6                |                     | 26.1                |                     |
| 195        |                          | 25.6                |                     | 26.1                |                     |
| 200        |                          | 25.6                |                     |                     |                     |
| 205        |                          | 25.6                |                     |                     |                     |
| 210        |                          | 25.6                |                     |                     |                     |
| 215        |                          | 25.6                |                     |                     |                     |
| 220        |                          | 25.6                |                     |                     |                     |

หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.5 ตารางอุณหภูมิน้ำและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวหยาบ  $3.07 \times 10^{-5}$

| เวลา (นาท) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|            | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0          | 27.5                     | 28.5                | 28                  | 28.2                | 28                  |
| 5          | 27.5                     | 28.2                | 27.9                | 28                  | 27.6                |
| 10         | 27.4                     | 28                  | 27.7                | 27.8                | 27.2                |
| 15         | 27.3                     | 27.8                | 27.4                | 27.6                | 27.1                |
| 20         | 27.2                     | 27.6                | 27.1                | 27.5                | 27                  |
| 25         | 27.1                     | 27.3                | 27                  | 27.5                | 26.8                |
| 30         | 27                       | 27.1                | 27                  | 27.4                | 26.6                |
| 35         | 27                       | 27                  | 26.9                | 27.3                | 26.4                |
| 40         | 27                       | 26.9                | 26.8                | 27.2                | 26.2                |
| 45         | 26.9                     | 26.9                | 26.7                | 27.2                | 26.1                |
| 50         | 26.9                     | 26.9                | 26.6                | 27.1                | 26.1                |
| 55         | 26.9                     | 26.8                | 26.6                | 27.1                | 26.2                |
| 60         | 26.8                     | 26.8                | 26.6                | 27                  | 26.2                |
| 65         | 26.8                     | 26.7                | 26.6                | 27                  | 26.1                |
| 70         | 26.8                     | 26.7                | 26.6                | 27                  | 26.1                |
| 75         | 26.8                     | 26.6                | 26.5                | 26.9                | 26.1                |
| 80         | 26.8                     | 26.6                | 26.5                | 26.9                | 26.1                |
| 85         | 26.8                     | 26.5                | 26.5                | 26.9                | 26.2                |
| 90         | 26.8                     | 26.5                | 26.5                | 26.9                | 26.2                |
| 95         | 26.8                     | 26.5                | 26.5                | 26.9                | 26.2                |
| 100        | 26.8                     | 26.5                | 26.5                | 26.8                | 26.2                |
| 105        | 26.7                     | 26.4                | 26.5                | 26.8                | 26.1                |
| 110        | 26.7                     | 26.4                | 26.5                | 26.7                | 26.1                |
| 115        | 26.7                     | 26.4                | 26.5                | 26.7                | 26.1                |
| 120        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.7                | 26.1                |
| 125        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.7                | 26.1                |
| 130        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.6                | 26.1                |
| 135        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.6                | 26.1                |
| 140        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.5                | 26.1                |
| 145        | 26.7                     | 26.4                | 26.6                | 26.5                | 26                  |
| 150        | 26.7                     | 26.3                | 26.5                | 26.4                | 26                  |
| 155        | 26.7                     | 26.3                | 26.5                | 26.3                | 26                  |
| 160        | 26.7                     | 26.3                | 26.6                | 26.3                | 26                  |
| 165        | 26.7                     | 26.3                | 26.5                | 26.2                | 26                  |
| 170        | 26.7                     | 26.3                | 26.6                | 26.2                | 26                  |
| 175        | 26.7                     | 26.3                | 26.6                | 26.2                | 26                  |
| 180        | 26.7                     | 26.3                | 26.6                | 26.2                | 26                  |
| 185        |                          | 26.3                | 26.6                | 26.2                |                     |
| 190        |                          | 26.3                | 26.6                | 26.2                |                     |
| 195        |                          | 26.3                | 26.6                | 26.2                |                     |
| 200        |                          | 26.3                |                     | 26.1                |                     |
| 205        |                          |                     |                     |                     |                     |
| 210        |                          |                     |                     |                     |                     |
| 215        |                          |                     |                     |                     |                     |
| 220        |                          |                     |                     |                     |                     |

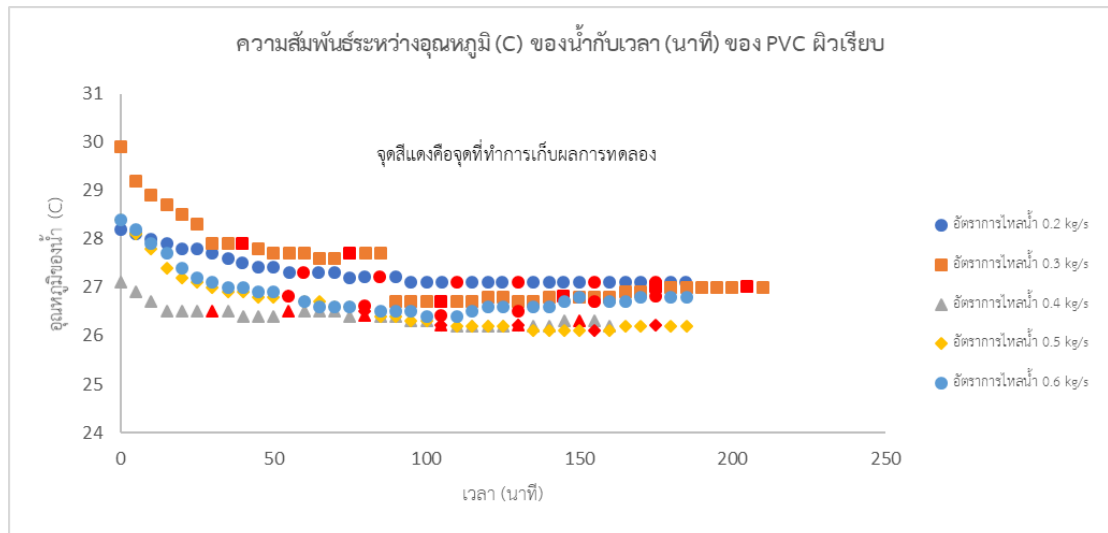
หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

ตารางที่ ค.6 ตารางอุณหภูมิน้ำและจุดที่เริ่มเก็บผลการทดลองของผิวเชิงการค้าเซลลูโลส

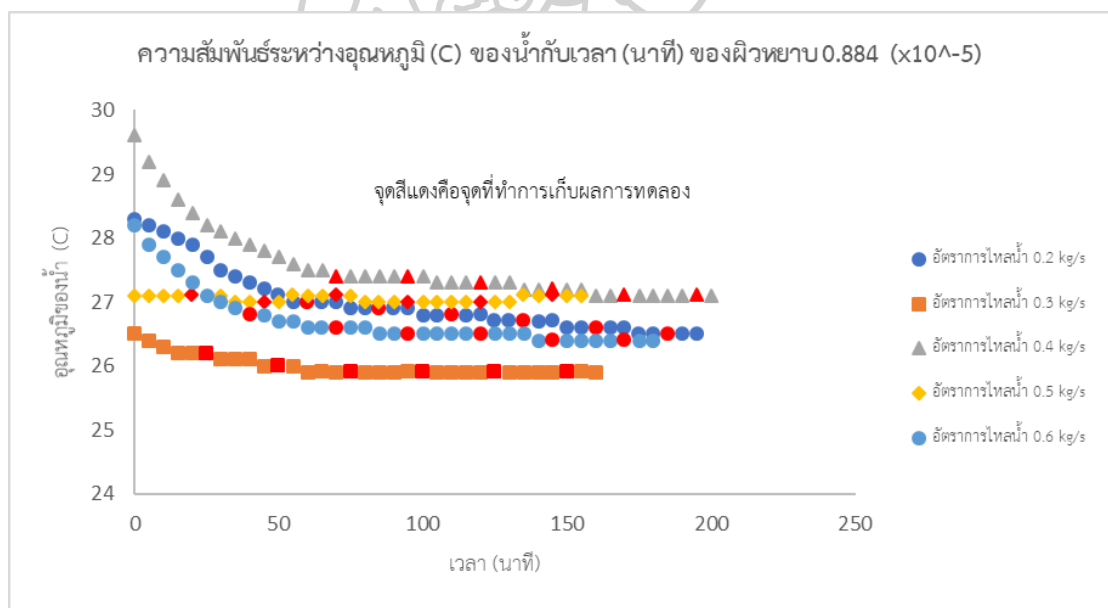
| เวลา (นาที) | อัตราการไหลของน้ำ (kg/s) |                     |                     |                     |                     |
|-------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|             | 0.2                      | 0.3                 | 0.4                 | 0.5                 | 0.6                 |
|             | อุณหภูมิ (เซลเซียส)      | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) | อุณหภูมิ (เซลเซียส) |
| 0           | 30.2                     | 29                  | 28.7                | 28.9                | 29.5                |
| 5           | 30                       | 28.9                | 28.5                | 28.5                | 29.1                |
| 10          | 29.3                     | 28.5                | 28.2                | 28.1                | 28.8                |
| 15          | 29                       | 28.2                | 27.9                | 27.9                | 28.3                |
| 20          | 28.8                     | 28                  | 27.5                | 27.6                | 28                  |
| 25          | 28.5                     | 27.9                | 27.3                | 27.4                | 27.8                |
| 30          | 28.1                     | 27.7                | 27                  | 27.1                | 27.4                |
| 35          | 28                       | 27.5                | 27                  | 27                  | 27.2                |
| 40          | 27.9                     | 27.2                | 26.9                | 26.9                | 27                  |
| 45          | 27.8                     | 27.2                | 26.8                | 26.8                | 27                  |
| 50          | 27.6                     | 27.2                | 26.7                | 26.7                | 27                  |
| 55          | 27.4                     | 27.2                | 26.5                | 26.5                | 27                  |
| 60          | 27.4                     | 27.1                | 26.4                | 26.3                | 26.9                |
| 65          | 27.4                     | 27                  | 26.4                | 26.3                | 26.9                |
| 70          | 27.2                     | 27                  | 26.4                | 26.2                | 27                  |
| 75          | 27.2                     | 27                  | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 80          | 27.2                     | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 26.9                |
| 85          | 27.2                     | 26.9                | 26.3                | 26.2                | 26.9                |
| 90          | 27.2                     | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 26.9                |
| 95          | 27.2                     | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 100         | 27.1                     | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 26.9                |
| 105         | 28                       | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 110         | 27.9                     | 26.9                | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 115         | 27.8                     | 26.9                | 26.3                | 26.2                | 27                  |
| 120         | 27.9                     | 27                  | 26.3                | 26.2                | 27                  |
| 125         | 27.9                     | 27                  | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 130         | 27.9                     | 27                  | 26.2                | 26.2                | 27                  |
| 135         | 27.9                     | 27                  | 26.3                | 26.2                | 27                  |
| 140         | 27.9                     | 27                  | 26.4                | 26.1                | 27                  |
| 145         | 27.9                     | 27                  | 26.3                | 26.1                | 27                  |
| 150         | 27.9                     | 27                  | 26.2                | 26.1                | 27                  |
| 155         | 27.9                     | 27                  | 26.2                | 26.1                | 27                  |
| 160         | 28                       | 27                  | 26.2                | 26.1                | 27                  |
| 165         | 28                       | 27                  | 26.2                | 26.1                | 27                  |
| 170         | 28                       | 27                  |                     | 26.1                | 27                  |
| 175         | 28                       | 27                  |                     | 26.1                | 27                  |
| 180         | 28                       | 27                  |                     | 26.1                |                     |
| 185         | 27.9                     | 27                  |                     | 26.1                |                     |
| 190         | 27.9                     | 27                  |                     |                     |                     |
| 195         | 27.9                     | 27                  |                     |                     |                     |
| 200         | 27.9                     | 27                  |                     |                     |                     |
| 205         | 27.9                     | 27                  |                     |                     |                     |
| 210         | 28                       | 27                  |                     |                     |                     |
| 215         | 28                       | 27                  |                     |                     |                     |
| 220         | 28                       |                     |                     |                     |                     |
| 225         | 27.9                     |                     |                     |                     |                     |
| 230         | 28                       |                     |                     |                     |                     |
| 235         | 28                       |                     |                     |                     |                     |
| 240         | 28                       |                     |                     |                     |                     |

หมายเหตุ: แถบสีแดงคือจุดที่เก็บผลการทดลอง

### กราฟอุณหภูมิของผิวเปียกแต่ละตัวอย่าง

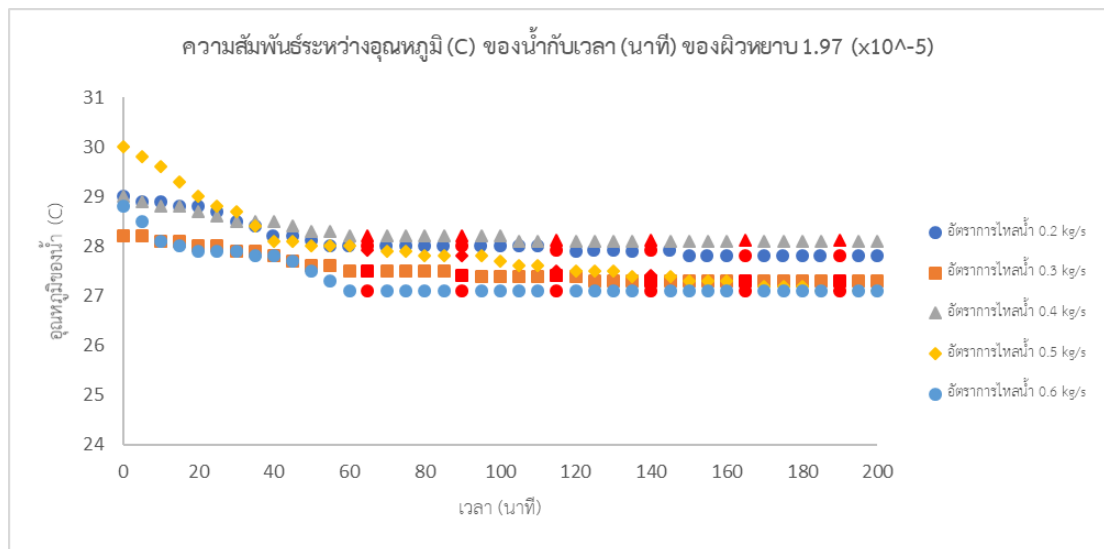


รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาท) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวเรียบ



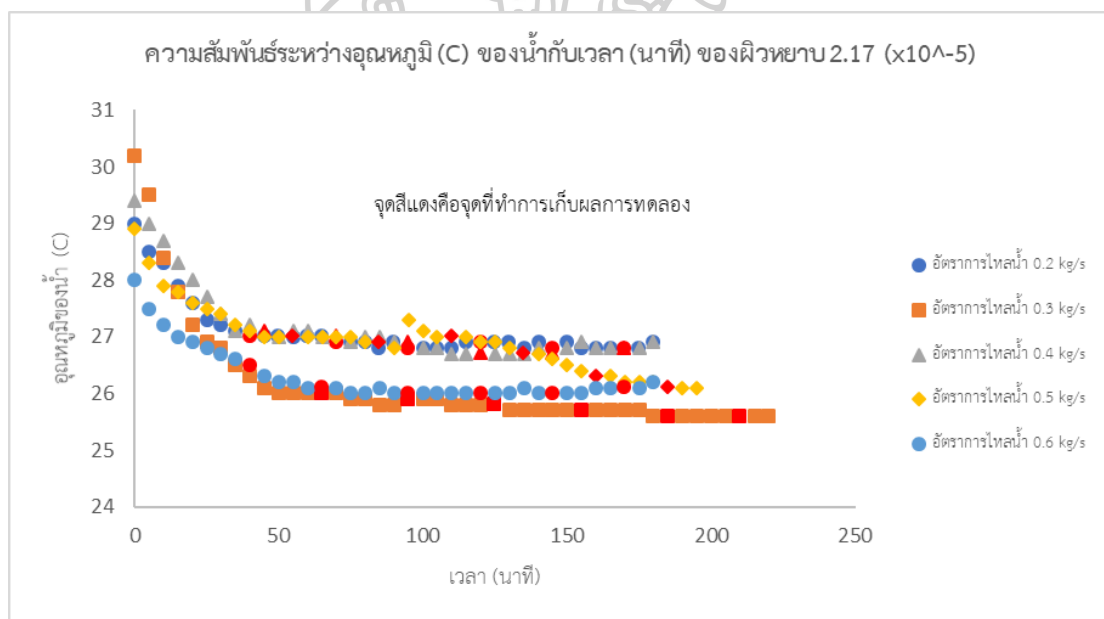
รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาท) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวหยาบ

$$0.884 \times 10^{-5}$$



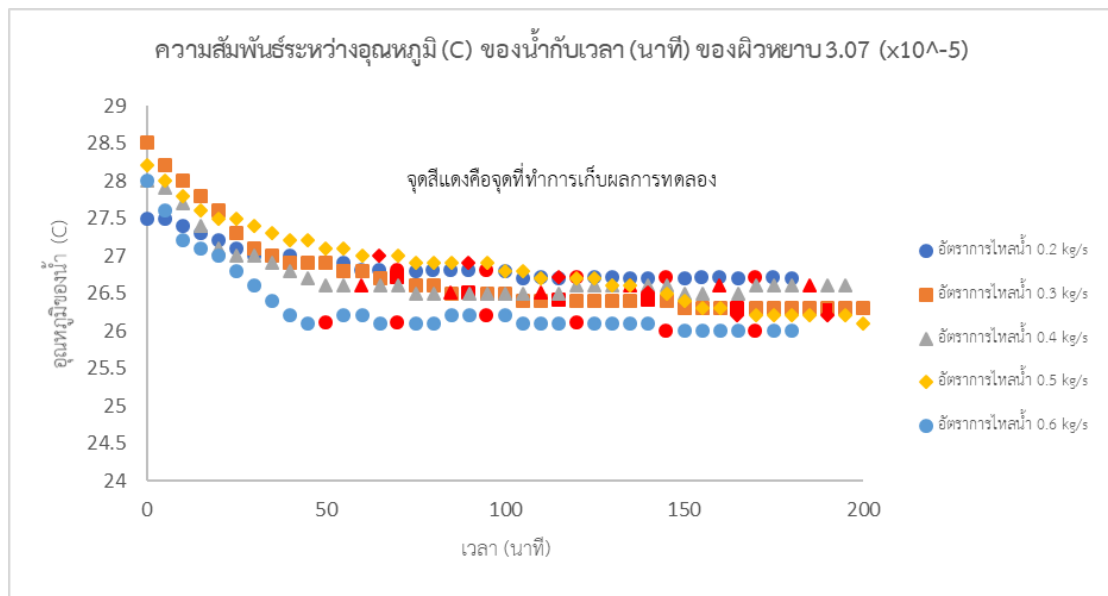
รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวหยาบ

$$1.97 \times 10^{-5}$$

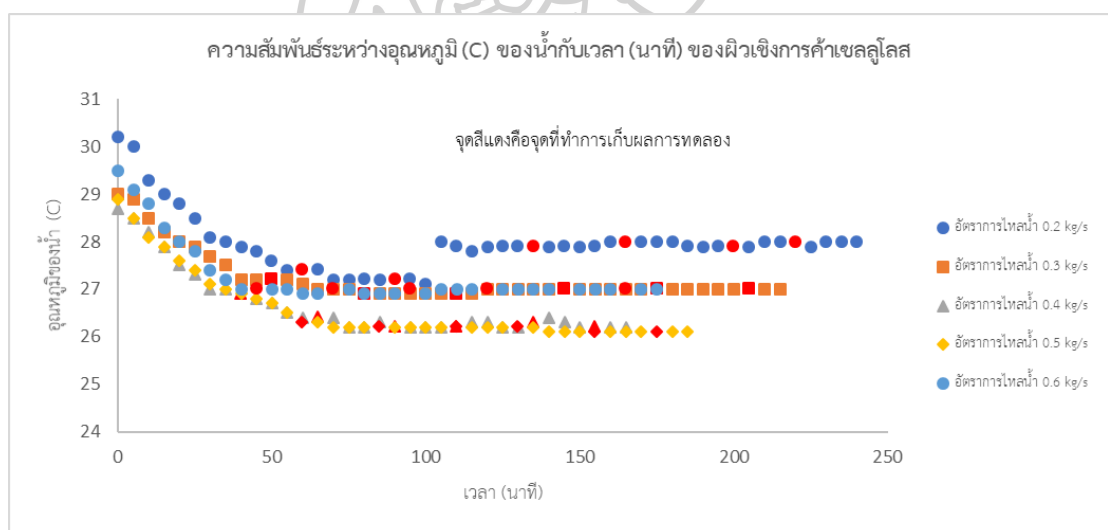


รูปที่ ค.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวหยาบ

$$2.17 \times 10^{-5}$$



รูปที่ ค.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาท) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวหยาบ  $3.07 \times 10^{-5}$



รูปที่ ค.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาท) กับอุณหภูมิ (เซลเซียส) ของพีวีซีผิวเชิงการค้า เซลลูโลส



### การคำนวณประสิทธิภาพลมตัว

ยกตัวอย่างจากตารางที่ ข.27 ผลการทดลองผิวหยาบ  $e/L$   $3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที ที่การเก็บผลครั้งที่ 1

จากสมการประสิทธิภาพลมตัวจะได้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = \left( \frac{T_{\text{db},i} - T_{\text{db},e}}{T_{\text{db},i} - T_{\text{wb}}} \right)$$

ทราบตัวแปรดังต่อไปนี้

$$T_{\text{db},i} = 32.44 \quad \text{องศาเซลเซียส}$$

$$\phi_i = 59.8\%$$

$$T_{\text{db},e} = 27.49 \quad \text{องศาเซลเซียส}$$

จาก  $T_{\text{db},i}$  และ  $\phi_i$  เปิด Psychometric chart จะได้  $T_{\text{wb},i} = 26$  องศาเซลเซียส

จะได้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = \left( \frac{32.44 - 27.49}{32.44 - 26} \right)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ประสิทธิภาพลมตัว  $\mathcal{E}_{\text{sat}} = 0.77$

### การคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ยกตัวอย่างจากตารางที่ ข.27 ผลการทดลองผิวหยาบ  $e/L$   $3.07 \times 10^{-5}$  ที่อัตราการไหลน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที ที่การเก็บผลครั้งที่ 1 ทราบตัวแปรดังต่อไปนี้

จากสมการประสิทธิภาพลมตัวจะได้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = 1 - e^{\left( \frac{h_c A}{\dot{m}_a c_{p,u}} \right)}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$h_c = - \frac{\ln(1 - \mathcal{E}_{\text{sat}}) \dot{m}_a c_{p,u}}{A}$$

ทราบตัวแปรดังต่อไปนี้

$$\mathcal{E}_{\text{sat}} = 0.77$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ  $\dot{m}_a$

$$\dot{m}_a = \rho_a A_p v$$

โดย

$$\rho_a = 1.1556 \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{ความดันที่ } T_{db,i} = 32.44 \text{ องศาเซลเซียส})$$

$$v = 0.25 \quad \text{m/s}$$

$$A_p = 0.0696 \quad \text{m}^2$$

$$\text{จะได้} \quad \dot{m}_a = 1.1556 \times 0.0696 \times 0.25$$

$$\text{เพราะฉะนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ } \dot{m}_a = 0.02 \text{ kg/s}$$

หาความจุความร้อนจำเพาะ  $c_{p,u}$

$$c_{p,u} = c_{p,a} + \omega c_{p,v}$$

โดย

$$c_{p,a} = 1.007 \quad \text{kJ/kg-K} \quad (\text{ความจุความร้อนจำเพาะที่ } T_{db,i} = 32.44 \text{ องศาเซลเซียส})$$

$$\omega = 0.0186 \quad \text{kg H}_2\text{O/kg Dry Air} \quad (T_{db,i} \text{ และ } \phi_i \text{ เปิด Psychometric chart})$$

$$\text{จะได้ } \omega = 0.0186 \text{ kg H}_2\text{O/kg Dry Air}$$

$$c_{p,v} = 1.4108 \quad \text{kJ/kg-K}$$

$$\text{จะได้} \quad c_{p,u} = [1.007 + 0.0186(1.4108)] \times 1000$$

$$\text{เพราะฉะนั้นความจุความร้อนจำเพาะ } c_{p,u} = 1032.85 \text{ J/kg-K}$$

$$A_s = 2.8 \quad \text{m}^2$$

$$\text{จะได้} \quad h_c = \frac{\ln(1 - 0.77) \times 0.02 \times 1032.85}{2.8}$$

$$\text{เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน } h_c = 10.72 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Error Bar)

การคำนวณความคลาดเคลื่อนในกรณีที่จำนวนชุดข้อมูลน้อยกว่า 30 ( $n \leq 30$ ) ใช้การกระจายตัวแบบ t (t-distribution) ดังตาราง ค่าตัวแทนชุดข้อมูลจากการวัดหาได้จาก ( $\mu$ )

$$\mu = \bar{X} \pm t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

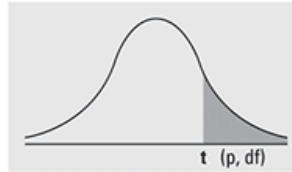
โดยที่  $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ย

$t_{\alpha/2, n-1}$  คือ t-distribution ดูได้จากตาราง

S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n คือ จำนวนตัวอย่าง

Numbers in each row of the table are values on a  $t$ -distribution with ( $df$ ) degrees of freedom for selected right-tail (greater-than) probabilities ( $p$ ).



| df/p | 0.40     | 0.25     | 0.10     | 0.05     | 0.025    | 0.01     | 0.005    | 0.0005   |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1    | 0.324920 | 1.000000 | 3.077684 | 6.313752 | 12.70620 | 31.82052 | 63.65674 | 636.6192 |
| 2    | 0.288675 | 0.816497 | 1.885618 | 2.919986 | 4.30265  | 6.96456  | 9.92484  | 31.5991  |
| 3    | 0.276671 | 0.764892 | 1.637744 | 2.353363 | 3.18245  | 4.54070  | 5.84091  | 12.9240  |
| 4    | 0.270722 | 0.740697 | 1.533206 | 2.131847 | 2.77645  | 3.74695  | 4.60409  | 8.6103   |
| 5    | 0.267181 | 0.726687 | 1.475884 | 2.015048 | 2.57058  | 3.36493  | 4.03214  | 6.8688   |
| 6    | 0.264835 | 0.717558 | 1.439756 | 1.943180 | 2.44691  | 3.14267  | 3.70743  | 5.9588   |
| 7    | 0.263167 | 0.711142 | 1.414924 | 1.894579 | 2.36462  | 2.99795  | 3.49948  | 5.4079   |
| 8    | 0.261921 | 0.706387 | 1.396815 | 1.859548 | 2.30600  | 2.89646  | 3.35539  | 5.0413   |
| 9    | 0.260955 | 0.702722 | 1.383029 | 1.833113 | 2.26216  | 2.82144  | 3.24984  | 4.7809   |
| 10   | 0.260185 | 0.699812 | 1.372184 | 1.812461 | 2.22814  | 2.76377  | 3.16927  | 4.5869   |
| 11   | 0.259556 | 0.697445 | 1.363430 | 1.795885 | 2.20099  | 2.71808  | 3.10581  | 4.4370   |
| 12   | 0.259033 | 0.695483 | 1.356217 | 1.782288 | 2.17881  | 2.68100  | 3.05454  | 4.3178   |
| 13   | 0.258591 | 0.693829 | 1.350171 | 1.770933 | 2.16037  | 2.65031  | 3.01228  | 4.2208   |
| 14   | 0.258213 | 0.692417 | 1.345030 | 1.761310 | 2.14479  | 2.62449  | 2.97684  | 4.1405   |
| 15   | 0.257885 | 0.691197 | 1.340606 | 1.753050 | 2.13145  | 2.60248  | 2.94671  | 4.0728   |
| 16   | 0.257599 | 0.690132 | 1.336757 | 1.745884 | 2.11991  | 2.58349  | 2.92078  | 4.0150   |
| 17   | 0.257347 | 0.689195 | 1.333379 | 1.739607 | 2.10982  | 2.56693  | 2.89823  | 3.9651   |
| 18   | 0.257123 | 0.688364 | 1.330391 | 1.734064 | 2.10092  | 2.55238  | 2.87844  | 3.9216   |
| 19   | 0.256923 | 0.687621 | 1.327728 | 1.729133 | 2.09302  | 2.53948  | 2.86093  | 3.8834   |
| 20   | 0.256743 | 0.686954 | 1.325341 | 1.724718 | 2.08596  | 2.52798  | 2.84534  | 3.8495   |
| 21   | 0.256580 | 0.686352 | 1.323188 | 1.720743 | 2.07961  | 2.51765  | 2.83136  | 3.8193   |
| 22   | 0.256432 | 0.685805 | 1.321237 | 1.717144 | 2.07387  | 2.50832  | 2.81876  | 3.7921   |
| 23   | 0.256297 | 0.685306 | 1.319460 | 1.713872 | 2.06866  | 2.49987  | 2.80734  | 3.7676   |
| 24   | 0.256173 | 0.684850 | 1.317836 | 1.710882 | 2.06390  | 2.49216  | 2.79694  | 3.7454   |
| 25   | 0.256060 | 0.684430 | 1.316345 | 1.708141 | 2.05954  | 2.48511  | 2.78744  | 3.7251   |
| 26   | 0.255955 | 0.684043 | 1.314972 | 1.705618 | 2.05553  | 2.47863  | 2.77871  | 3.7066   |
| 27   | 0.255858 | 0.683685 | 1.313703 | 1.703288 | 2.05183  | 2.47266  | 2.77068  | 3.6896   |
| 28   | 0.255768 | 0.683353 | 1.312527 | 1.701131 | 2.04841  | 2.46714  | 2.76326  | 3.6739   |
| 29   | 0.255684 | 0.683044 | 1.311434 | 1.699127 | 2.04523  | 2.46202  | 2.75639  | 3.6594   |
| 30   | 0.255605 | 0.682756 | 1.310415 | 1.697261 | 2.04227  | 2.45726  | 2.75000  | 3.6460   |
| z    | 0.253347 | 0.674490 | 1.281552 | 1.644854 | 1.95996  | 2.32635  | 2.57583  | 3.2905   |
| CI   | ———      | ———      | 80%      | 90%      | 95%      | 98%      | 99%      | 99.9%    |

ยกตัวอย่างประสิทธิผลอิมิต์จากตารางที่ ข.59 ผลการทดลองผิวหยาบ  $e/L$   $3.07 \times 10^{-5}$  ที่ อัตราการไหลน้ำ 0.6 กิโลกรัมต่อวินาที จากสมการการหาค่าความคลาดเคลื่อนจะได้

$$\bar{X} = \frac{0.77 + 0.77 + 0.77 + 0.77 + 0.78 + 0.79}{6} = 0.775$$

ค่า  $t_{\alpha/2, n-1}$  ของจำนวนตัวอย่าง 6 ตัวอย่าง และความเชื่อมั่น 95% ดูได้จากตารางจะได้ค่า  $t_{\alpha/2, n-1}$  เท่ากับ 2.571

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0.0084$$

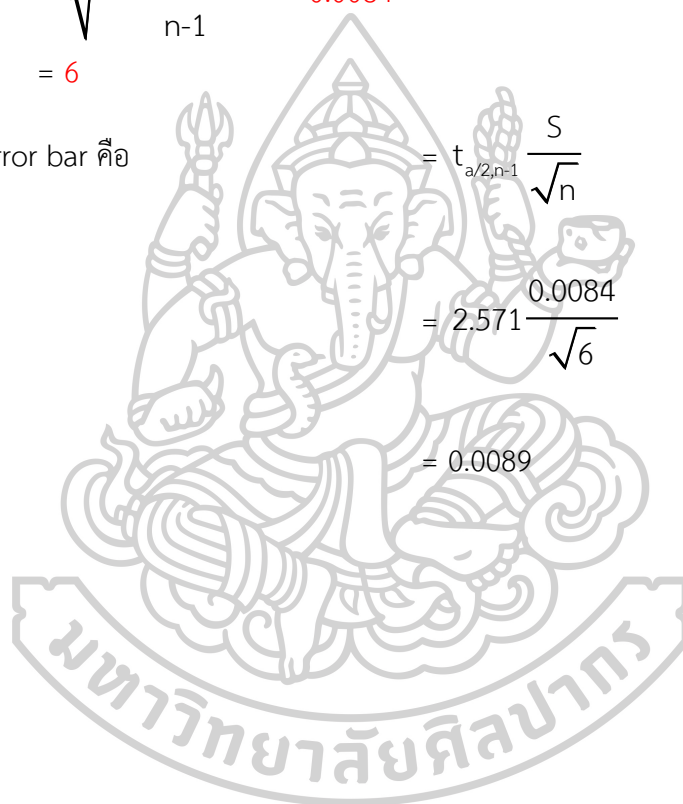
$$n = 6$$

ได้ Error bar คือ

$$= t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$= 2.571 \frac{0.0084}{\sqrt{6}}$$

$$= 0.0089$$



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ศุภณัฐ แต่งเจริญสุข

วุฒิการศึกษา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

