



การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T)  
โดยใช้ครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน  
Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels  
by Using Ribs for Heat Transfer Augmentation

ธนากรณ์ สุขคะโต  
Tanakorn Sukkato

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T)  
โดยใช้ครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน  
Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels  
by Using Ribs for Heat Transfer Augmentation

ธนากรณ์ สุขคะโต  
Tanakorn Sukkato

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยใช้ใช้ครีปเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน
ผู้เขียน	นายธนากรณ์ สุขคะโต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)	.....ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล)	.....กรรมการ (ดร.มัทตาร์ แวหะยี)
..... (ดร.มัทตาร์ แวหะยี)	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ประसान สถิตย์เรืองศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสง)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายธนากรณ์ สุขคะโต)

นักศึกษา



ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายธนากรณ์ สุขคะโต)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยใช้ใช้ครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน
ผู้เขียน	นายธนากรณ์ สุขคะโต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

จากการสนับสนุนของรัฐบาลทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นที่นิยมมากขึ้น แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โดยทั่วไปนั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพียง 15% และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของแผงสูงขึ้น ปัจจุบันได้มีการคิดค้นวิธีการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์และนำความร้อนที่ได้มานั้นไปใช้ประโยชน์ โดยการติดตั้งตัวระบายความร้อนเข้ากับด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเรียกระบบดังกล่าวว่า แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนหรือ แผง PV/T (Photovoltaic Thermal panel) เนื่องจากตัวระบายความร้อนที่มีอยู่เดิมมีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากแผงต่ำทำให้แผง PV/T ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำเช่นกัน ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนให้กับแผง PV/T ด้วยการติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนภายในตัวระบายความร้อน ซึ่งครีบบจะสร้างความปลอดภัยให้กับของไหลภายในตัวระบายความร้อนส่งผลให้ความสามารถในการระบายความร้อนสูงขึ้น งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในตัวระบายความร้อนที่ติดตั้งครีบบและช่องการไหล ซึ่งรูปแบบครีบบและช่องการไหลใช้ในการศึกษาได้แก่ ครีบบแบบเอียง มุม 30° ถึง 90° ครีบบรูปตัววี มุม 30° ถึง 60° ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแตก สำหรับลักษณะช่องการไหลได้แก่ ช่องการไหลแบบขนานและช่องการไหลแบบวกกลับรวมทั้งสิ้น 28 กรณี เพื่อหาแบบการติดตั้งครีบบและช่องการไหลที่ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดตั้งครีบบด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15 (Fluent) เพื่อเปรียบเทียบและอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับการทดลอง การทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งครีบบในช่องการไหลของตัวระบายความร้อน เป็นการนำแผง PV/T ที่ได้ปรับปรุงติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนไปทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั่วไป หรือ แผง PV ที่เงื่อนไขการใช้งานแบบทั่วไปและสุดท้ายการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายของระบบโดยเปรียบเทียบระหว่างแผง PV กับแผง PV/T กรณีที่ผู้ติดตั้งมีความต้องการใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อน จากการศึกษาในส่วนของคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลพบว่า ครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉพาะการติดตั้งครีบบในช่องการไหลแบบ

วกกลับ เนื่องจากการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีจะสร้างคู่อไหลวนขนาดใหญ่ภายในหน้าตัดช่องการไหล และการไหลวนนี้จะเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้ไหลเกาะติดพื้นผิวถ่ายเทความร้อนทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นครีบริบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° และช่องการไหลแบบวกกลับจึงถูกนำไปติดตั้งในตัวระบายความร้อนของแผง PV/T สำหรับในส่วนของ การทดสอบประสิทธิภาพแผง PV/T ที่ติดตั้งครีบริบในตัวระบายความร้อนพบว่า อุณหภูมิของแผง PV/T จะมีค่าต่ำกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 8-10 °C ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของแผง PV/T มีค่าสูงกว่าแผง PV ที่ 6.8-14.0% นอกจากนี้ยังพบว่าแผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนที่ 13.0-14.9% และ 39.0-53.0% ตามลำดับ ขณะที่แผง PV มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ 12.0-14.4% และจากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า แผง PV/T มีระยะเวลาคืนทุนพิจารณาจากการใช้ไฟฟ้าประเภทที่อยู่อาศัย ที่ 1.1 และ 1.2 เป็น 5.8 ปี และ 5.1 ปี ตามลำดับและจะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่าการติดตั้งแผง PV แบบทั่วไปประมาณ 8 เดือน

<b>Thesis Title</b>	Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels by Using Ribs for Heat Transfer Augmentation
<b>Author</b>	Tanakorn Sukkato
<b>Major Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Academic Year</b>	2019

### ABSTRACT

According to the result of government policy, the production of electrical energy by Photovoltaic (PV) panels is more popular. Normally, the PV panel there is distributed 15% efficiency and it will decrease when the temperature of panels increased. Nowadays, the cooling methods for PV panels are improved and this can make benefit from the heat of a panel by installing the cooling module at the back of a PV panel. The Photovoltaic/Thermal (PV/T) panel is called for energy generating unit. But currently, the normal cooling module generates lower heat transfer ability from the PV panel. Therefore, the objective of this research is to increase the electrical and thermal efficiency of PV/T panel by attaching rib turbulators in the cooling module of PV/T. The rib turbulators will produce turbulence flow that can increase heat transfer effect from PV panel to water in the system. This research is separated into 4 sections, First, the studies of heat transfer characteristic in the cooling module which was attached rib turbulators and the flow channel. The type of rib arrangement such as inclined ribs 30° to 90°, V-shaped ribs 30° to 60° in both continuous and broken type. The ribs are installed in both parallel and serpentine channel. This will find the type of ribs arrangement which can give the highest heat transfer ability. Second, the studies of flow characteristic by using ANSYS Ver.15 (Fluent). This section is a simulation with a computer program to compare and explain the heat transfer characteristic with the experimental result. Third, the efficiency testing of PV/T panel which was attached ribs in the cooling module. This section is the comparison of panel temperature, power generating and system efficiency between PV/T and normal PV panel with normal climate conditions. The last section of this research is economic analysis. This part shows the simple payback periods that consider the cost and total energy of the system. According to the result of heat transfer and flow characteristic shows that 45°

continuous V ribs were the highest heat transfer ability, especially for the serpentine channel. Because the water flow through the continuous V ribs and the strong secondary flow occurred over the channel cross-section. This flow will induce the streamline to attach the heat transfer surface to increase heat transfer ability. Then, the 45° continuous V rib is used in PV/T cooling module. From the PV/T efficiency testing found that temperature of PV/T panel is lower than PV panel about 8-10°C, the electrical power of PV/T panel is higher than PV 6.8-14.0%, the average electrical and thermal efficiency of PV/T are 13.0-14.9% and 39.0-53.0% respectively while the average electrical efficiency of PV is 12.0-14.4%. Finally, the economic analysis found that the simple payback period of PV/T panel consider from electrical use type 1.1 and 1.2 are 5.8 and 5.1 years respectively. Therefore, the payback period of PV/T is faster than PV for about 8 months.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยเสนอแนะแนวทางและเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล ดร.มัทตาร์ แวหะยี และ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากรภายใน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วย

ขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษาและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ธนากรณ์ สุขคะโต

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(23)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	<b>4</b>
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์	4
2.1.1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	5
2.1.2 การประยุกต์นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์	6
2.2 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	7
2.2.1 รูปแบบของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	7
2.2.2 ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์	9
2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	12
2.3.1 รูปแบบระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์	15
2.3.3 การคำนวณประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน	23
2.4 แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือแผง PV/T	26
2.4.1 การคำนวณประสิทธิภาพของแผง PV/T	27
2.5 การถ่ายเทความร้อน	28
2.5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	31
2.5.3 การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	32
2.5.4 การระบายความร้อนแบบธรรมชาติและการระบายความร้อนแบบบังคับ	34
2.6 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	35
2.6.1 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสมรรถนะและการลดอุณหภูมิของแผง PV	35
2.6.2 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับครีบบระบายความร้อนและช่องการไหล	40
2.6.3 ทบทวนสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง	45
2.6.4 สรุปการทบทวนเอกสาร	49
<b>บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย</b>	<b>50</b>
3.1 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบ	50
3.1.1 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบ	51
3.1.2 วิธีทดสอบการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบ	60
3.1.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบ	62
3.1.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพความร้อน	64
3.2 การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบบ	65
3.2.1 สมการควบคุมการไหล	65
3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน	66
3.2.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง	68
3.2.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง	68
3.2.4 การสร้างแบบจำลองและกริด	69
3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	71
3.2.6 วิธีการคำนวณ	73
3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่มีการปรับปรุงติดครีบบและช่องการไหลของน้ำในตัวเก็บความร้อน	74



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ชุดทดสอบแผง PV/T	74
3.3.2 วิธีการทดสอบ	82
3.3.3 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของแผง PV/T	84
3.3.4 การคำนวณค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง PV/T	85
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	<b>88</b>
4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้ง	88
4.1.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนาน	89
4.1.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ	93
4.1.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบ ความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน	97
4.1.4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบ ความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบวกกลับ	100
4.1.5 สรุปผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้ง	103
4.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดตั้ง	104
4.2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนระหว่างการจำลอง การไหลกับการทดลอง	104
4.2.2 ผลการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนาน	106
4.2.3 ผลการจำลองลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบบน สร้างความปั่นป่วน	109
4.2.4 ผลการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ	114
4.2.5 ผลการจำลองลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบวกกลับที่ติดตั้ง ครีบบนสร้างความปั่นป่วน	117
4.2.6 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบ ความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนของการจำลองการไหลบน พื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน	125

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.7 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลล์ต์นมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบ ความเสียหายและสมรรถนะเชิงความร้อนของการจำลองการไหลบน พื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งในช่องการไหลแบบวงกลับ	128
4.2.8 สรุปผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลติดตั้ง	131
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T ติดตั้งเพิ่มความสามารถถ่ายเท ความร้อน	132
4.3.1 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T	133
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ กำลังไฟฟ้า และพลังงานที่แผง PV และ PV/T ผลิตได้ต่อวัน	137
4.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทาง ความร้อนของแผง PV/T	150
4.3.4 กำลังและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแผง PV/T	157
4.3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	159
4.3.6 แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากแผง PV/T	163
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>164</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	164
5.2 ข้อเสนอแนะ	165
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>166</b>
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลน้ำ 8 และ 12 LPM	169
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่า Uncertainty ของการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน	186
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ ซิลิกอน	191
ภาคผนวก ง บทความสำหรับเผยแพร่ 1	195
ภาคผนวก จ บทความสำหรับเผยแพร่ 2	205
ภาคผนวก ฉ บทความสำหรับเผยแพร่ 3	215
ประวัติผู้เขียน	231

## รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ส่วนประกอบของชุดทดสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ	54
ตารางที่ 3.2	ขนาดของครีบและช่องการไหลที่ใช้ในส่วนทดสอบของงานวิจัย	59
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ	61
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ	70
ตารางที่ 3.5	สรุปอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบ PV/T	80
ตารางที่ 4.1	พลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้จากแผง PV/T ในแต่ละวันที่ทำการทดสอบ	149
ตารางที่ 4.2	สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T และแผง PV	157
ตารางที่ 4.3	ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าผลิตที่เพิ่มขึ้นของแผง PV/T เมื่อเทียบกับแผง PV	158
ตารางที่ 4.4	ต้นทุนของระบบผลิตพลังงาน	159
ตารางที่ 4.5	สรุปผลค่าพลังงานที่ใช้ในการคำนวณมูลค่าการลดการใช้ไฟฟ้า ของแผง PV และ PV/T 83	161
ตารางที่ 4.6	ระยะเวลาคืนทุนของแผง PV และ PV/T จากประเภทการใช้ไฟฟ้า ที่ 1.1 และ 1.2	162

## รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 2.1	แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี	5
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของประเทศต่างๆ	6
รูปที่ 2.3	หลักการการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ	8
รูปที่ 2.4	แผนภาพหลักการการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ	9
รูปที่ 2.5	ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	10
รูปที่ 2.6	ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ	11
รูปที่ 2.7	ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบรวบรวมแสงท่อสุญญากาศ	12
รูปที่ 2.8	ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่จ่ายโหลดโดยตรง	13
รูปที่ 2.9	ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่	13
รูปที่ 2.10	ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.11	ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	15
รูปที่ 2.12	หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	16
รูปที่ 2.13	แผนภาพชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	16
รูปที่ 2.14	ลักษณะของก้อนผลึกซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน	17
รูปที่ 2.15	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน	17
รูปที่ 2.16	ลักษณะของก้อนผลึกซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน	19
รูปที่ 2.17	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน	19
รูปที่ 2.18	ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	21
รูปที่ 2.19	คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ 0 ถึง 75 °C	23
รูปที่ 2.20	คุณลักษณะของกำลังและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ 0 ถึง 75 °C	23
รูปที่ 2.21	การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน	24
รูปที่ 2.22	แนวคิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผง PV/T	26
รูปที่ 2.23	ระบบแผง PV/T ที่ติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน	27
รูปที่ 2.24	การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนจากพื้นผิวไปยังของไหล	29
รูปที่ 2.25	อุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุของการพาความร้อนแบบบังคับ	30
รูปที่ 2.26	ชั้นขอบเขตของการไหลบนพื้นผิว	31

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.27	ลักษณะของตัวสร้างความปั่นป่วนที่ใช้เพื่อขวางการไหล	31
รูปที่ 2.28	การติดพินบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	32
รูปที่ 2.29	โครงสร้างการไหลผ่านครีบสร้างความปั่นป่วน	33
รูปที่ 2.30	สัมประสิทธิ์การเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	33
รูปที่ 2.31	ผลของผนังด้านข้างต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	33
รูปที่ 2.32	การสร้างฟิล์มน้ำไหลผ่านพื้นผิวรับแสงโดยใช้หัวฉีดจำนวน 12 หัว	35
รูปที่ 2.33	การระบายความร้อนให้แผง PV ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำที่ผิวรับแสง	36
รูปที่ 2.34	การพ่นละอองน้ำเพื่อระบายความร้อนที่ด้านหน้าและหลังแผง PV	36
รูปที่ 2.35	รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ใช้ในการทดสอบแผง PV	37
รูปที่ 2.36	ส่วนประกอบของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์	38
รูปที่ 2.37	ภาพหน้าตัดของตัวเก็บความร้อนที่ใช้กับแผง PV/T	38
รูปที่ 2.38	ลักษณะของช่องการไหลทั้งสองแบบที่ใช้เป็นตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T	39
รูปที่ 2.39	รูปแบบการไหลตามแนวกระแสการไหลของครีบที่ระยะ p/e ต่างๆ	40
รูปที่ 2.40	อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างต่อการถ่ายเทความร้อน	42
รูปที่ 2.41	ผลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อน	43
รูปที่ 2.42	รูปแบบการติดตั้งครีบที่ใช้ทดสอบการถ่ายเทความร้อน	44
รูปที่ 2.43	การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของรูปแบบการติดตั้งครีบ	44
รูปที่ 2.44	แผง PV ที่ติดตั้งรางน้ำเพื่อสร้างฟิล์มน้ำระบายความร้อน	45
รูปที่ 2.45	การระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำไหลผ่านพื้นผิวรับแสงของแผง PV	45
รูปที่ 2.46	แผง PV ที่ติดตั้งหัวฉีดพ่นละอองน้ำระบายความร้อนและทำความสะอาดผิวรับแสง	46
รูปที่ 2.47	โมเดลแผง PVT แบบแยกส่วน	47
รูปที่ 2.48	ภาพหน้าตัดการประกอบตัวจับยึดแผง PVT	47
รูปที่ 2.49	รางน้ำระบายความร้อนที่ติดตั้งหัวฉีด	48
รูปที่ 2.50	ลักษณะช่องบังคับการไหลแบบวงกลับ	48
รูปที่ 3.1	รูป 3 มิติของส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ	52
รูปที่ 3.2	พื้นที่ที่วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบในโมเดล	52
รูปที่ 3.3	ภาพถ่ายส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน	53
รูปที่ 3.4	รูปร่างของครีบสร้างความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน	57

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.5	ลักษณะช่องการไหลที่ใช้ในการทดลอง	58
รูปที่ 3.6	ลักษณะการไหลของน้ำบริเวณพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลทั้ง 2 แบบ	58
รูปที่ 3.7	โมเดลแสดงช่องการไหลที่ติดครีบบนพื้นผิว	59
รูปที่ 3.8	แผนภาพชุดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิว	61
รูปที่ 3.9	การแปลงภาพถ่ายอุณหภูมิเป็นภาพการกระจายค่าสเกลสีบนพื้นผิว	64
รูปที่ 3.10	การกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง	69
รูปที่ 3.11	แบบจำลองการติดตั้งครีบบนพื้นผิวต่อเนื่องมุม $90^\circ$ ในช่องการไหลแบบขนาน	69
รูปที่ 3.12	รูปแบบกริดของแบบจำลองการไหลที่ติดครีบบนช่องบังคับการไหลแบบขนาน	71
รูปที่ 3.13	รูปแบบกริดของแบบจำลองการไหลที่ติดครีบบนช่องบังคับการไหลแบบวงกลับ	71
รูปที่ 3.14	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองการไหล	72
รูปที่ 3.15	โมเดลชุดทดสอบแผง PV/T	75
รูปที่ 3.16	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ที่ใช้ในชุดทดสอบ	76
รูปที่ 3.17	โมเดลระบายความร้อนที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิวมุม $45^\circ$	76
รูปที่ 3.18	ระบบท่อน้ำเข้า-ออกซึ่งถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน	77
รูปที่ 3.19	ถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนและการติดตั้งระบบท่อของแผง PV/T	77
รูปที่ 3.20	ชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV	78
รูปที่ 3.21	ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย	78
รูปที่ 3.22	เครื่องวัดอัตราการไหลและเกจวัดความดันที่ติดตั้งในระบบ PV/T	79
รูปที่ 3.23	แผนภาพชุดทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T	83
รูปที่ 3.24	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	87
รูปที่ 4.1	การกระจายของค่าสเกลสีบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนพื้นผิว ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบนพื้นผิวต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	91
รูปที่ 4.2	การกระจายของค่าสเกลสีบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนพื้นผิว ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบนพื้นผิวแยก ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	92
รูปที่ 4.3	การกระจายของค่าสเกลสีบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนพื้นผิว ในช่องการไหลแบบวงกลับ กรณีครีบบนพื้นผิวต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )	95

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4	96
การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ ในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบนที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.5	97
อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.6	98
อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วน ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.7	99
สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบ ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.8	100
อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ ในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.9	101
อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วน ในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.10	102
สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบ ในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.11	105
ตัวอย่างการเปรียบเทียบการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์	
รูปที่ 4.12	107
ผลการจำลอง การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ติดตั้งครีบ	
รูปที่ 4.13	108
ผลการจำลอง การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ติดตั้งครีบ	
รูปที่ 4.14	110
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบุม $90^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.15	111
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบุม $30^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.16	111
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบุม $45^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )	

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17	112
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบม $60^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ $4$ LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.18	112
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบรูปตัววีมุม $30^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ $4$ LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.19	113
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบรูปตัววีมุม $45^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ $4$ LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.20	113
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบรูปตัววีมุม $60^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ $X'/e = 3, 6$ และ $9$ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ $4$ LPM ( $Re = 400$ )	
รูปที่ 4.21	115
ผลการจำลอง การกระจายของค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบ	
รูปที่ 4.22	116
ผลการจำลอง การกระจายของค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบ	
รูปที่ 4.23	118
โมเดลและระนาบที่ใช้แสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในช่องการไหลแบบวกกลับ	
รูปที่ 4.24	118
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบม $90^\circ$ บนระนาบ Y-Z	
รูปที่ 4.25	119
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบม $30^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล $4$ LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.26	120
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบม $45^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล $4$ LPM ( $Re = 2,000$ )	
รูปที่ 4.27	121
การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบม $60^\circ$ บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล $4$ LPM ( $Re = 2,000$ )	



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.28 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบริบรูปตัววีมุม 30° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM (Re = 2,000)	122
รูปที่ 4.29 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบริบรูปตัววีมุม 45° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM (Re = 2,000)	123
รูปที่ 4.30 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบริบรูปตัววีมุม 60° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM (Re = 2,000)	124
รูปที่ 4.31 อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบริบบางแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM (Re = 400)	125
รูปที่ 4.32 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการจำลองการไหล	126
รูปที่ 4.33 สมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจำลองการไหล	127
รูปที่ 4.34 อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองการไหล	128
รูปที่ 4.35 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการจำลองการไหล	129
รูปที่ 4.36 สมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจำลองการไหล	130
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายระบบแผง PV/T และแผง PV สำหรับการทดสอบจริง ที่ติดตั้ง ณ ดาดฟ้า ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (พิกัด 7° 00' 15.6"N 100° 30' 65.4" E)	132
รูปที่ 4.38 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s จากการทดสอบวันที่ 22 เมษายน 2562	134
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s จากการทดสอบวันที่ 24 เมษายน 2562	135
รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s จากการทดสอบวันที่ 1 พฤษภาคม 2562	136



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.52 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และแผง PV/T กับความเข้มแสงตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 1 พฤษภาคม 2562	148
รูปที่ 4.53 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562	151
รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562	151
รูปที่ 4.55 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 23 เมษายน 2562	152
รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 23 เมษายน 2562	152
รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562	153
รูปที่ 4.58 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562	153
รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 25 เมษายน 2562	154
รูปที่ 4.60 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 25 เมษายน 2562	154
รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 28 เมษายน 2562	155
รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 28 เมษายน 2562	155
รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะกับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562	156
รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562	156
รูปที่ 4.65 แผนภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบต่างๆของอาคารควบคุมประเภทโรงพยาบาล	163

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

แผง PV	ย่อมาจาก	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic panel)
แผง PV/T	ย่อมาจาก	แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (Photovoltaic/Thermal panel)
STC	ย่อมาจาก	สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition)
$P_e$	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงPV หน่วยคือ W
$I$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงPV ณ จุดที่วัดกำลังไฟฟ้า หน่วยคือ A
$V$	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงPV ณ จุดที่วัดกำลังไฟฟ้า หน่วยคือ V
$I_T$	คือ	ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ หน่วยคือ $W/m^2$
$A_{pv}$	คือ	พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วยคือ $m^2$
$T_m$	คือ	อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วยคือ $^{\circ}C$
$T_{a,i}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศขาเข้าระบบระบายความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$T_{a,o}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศขาออกระบบระบายความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$\tau\alpha$	คือ	ผลคูณค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์
$T_{f,i}$	คือ	อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าระบบระบายความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$T_{f,o}$	คือ	อุณหภูมิของของไหลที่ทางออกระบบระบายความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$T_w$	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$T_\alpha$	คือ	อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อน หน่วยคือ $^{\circ}C$
$m$	คือ	มวลของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน หน่วยคือ kg
$m'$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน หน่วยคือ $kg/s$
$C_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล หน่วยคือ $kJ/kg\cdot^{\circ}C$
$Q'$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน หน่วยคือ kW
$Q_{conv}$	คือ	ปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน หน่วยคือ W
$h$	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน หน่วยคือ $W/m^2\cdot^{\circ}C$
$h_T$	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ด้านหน้าของแผง PV หน่วยคือ $W/m^2\cdot^{\circ}C$
$h_B$	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ด้านหลังของแผง PV หน่วยคือ $W/m^2\cdot^{\circ}C$
$\eta_o$	คือ	ประสิทธิภาพรวมของแผง PV/T หน่วยคือ %
$\eta_{el}$	คือ	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV, PV/T หน่วยคือ %
$\eta_{th}$	คือ	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T หน่วยคือ %

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัญหาการขาดแคลนพลังงานส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศที่กำลังขยายตัวอย่างรวดเร็ว กลุ่มอุตสาหกรรม การท่องเที่ยวและคมนาคมขนส่งล้วนต้องการการบริการโครงข่ายพลังงานที่สูงขึ้น ประเทศไทยเป็นประเทศที่นำเข้าพลังงานหลัก อาทิ น้ำมันเชื้อเพลิงสูงถึงร้อยละ 85 เพื่อใช้ในการขนส่ง ใช้ก๊าซธรรมชาติสูงถึงร้อยละ 60 ในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ยังนำเข้าไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้านอีกร้อยละ 10 [1] จากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกว่า 70 จังหวัดของประเทศไทยในวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ.2561 ด้วยเหตุขัดข้องของโรงไฟฟ้าหงสา สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าประเทศไทยยังขาดเสถียรภาพทางด้านพลังงาน การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อาทิ ปัญหาโลกร้อนและปัญหาฝุ่นควันขนาดเล็กซึ่งจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน จากข้อตกลงว่าด้วยก๊าซเรือนกระจก (Nationally Appropriate Mitigation Action : NAMAs) ทำให้ประเทศไทยต้องปรับแผนการใช้พลังงานด้วยการลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพ และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อลดความเข้มข้นการใช้พลังงาน (Energy Intensity) จากเชื้อเพลิงฟอสซิลลงร้อยละ 30 ในปี พ.ศ.2579

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหมุนเวียนรูปแบบหนึ่งที่มีความสะอาด ปราศจากมลพิษ และไม่มีต้นทุนในการผลิต ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตรจึงได้รับความเข้มแสงอาทิตย์สูงเกือบตลอดทั้งปีโดยพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 18-20 MJ/m<sup>2</sup>-day ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆที่นำพลังงานชนิดนี้มาใช้ประโยชน์ ปัจจุบันประเทศไทยมีการประยุกต์พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic panel) หรือแผง PV ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและใช้ได้ยาวนาน นอกจากข้อดีที่กล่าวมานั้นภาครัฐยังมีการส่งเสริมการอนุรักษ์และใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นด้วยนโยบายเหล่านี้ทำให้ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆรวมถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งนั้นถูกลงกระตุ้นให้มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกา (Silica) แล้วนำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ทำให้มีความสามารถในการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าทันทีเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่พื้นผิวด้านหน้า (ผิวรับแสง) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายทั่วไปในปัจจุบันจะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 15% จากการทดสอบตามมาตรฐาน (Standard Test Condition : STC) ซึ่งกำหนดค่าความเข้มแสงที่ 1,000 W/m<sup>2</sup> และอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25 °C จะแต่ในการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงนั้น แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดความร้อนบริเวณผิวรับแสงและสะสมอยู่ใน

โครงสร้างซึ่งทำจากโลหะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น หากเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงเกิน  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง โดยสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนนั้น ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง  $0.5\%$  ต่อ  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  และสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนั้น ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง  $0.27\%$  ต่อ  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายคิดค้นวิธีการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งการระบายความร้อนที่ด้านหน้า (ผิวรับแสง) ด้วยการสร้างฟิล์มน้ำไหลผ่านหรือการพ่นละอองน้ำให้กับผิวรับแสงและการระบายความร้อนที่ด้านหลังแผง เช่น การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน การติดตั้งท่อน้ำและช่องการไหลของน้ำเพื่อดึงความร้อนออกจากด้านหลังของแผง ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นตัวเก็บความร้อน (Thermal Collector) ซึ่งจะดึงความร้อนออกจากด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วนำความร้อนนั้นไปใช้ประโยชน์ต่อไป อาทิ การทำน้ำร้อนเพื่ออาบ การชำระล้างหรือการอุ่นระบบก่อนนำไปใช้ และเรียกหน่วยผลิตพลังงานที่ผสมผสานระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับตัวเก็บความร้อนนี้ว่า แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (Photovoltaic/Thermal panel) หรือแผง PV/T ซึ่งสามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในหน่วยติดตั้งเดียวกันทำให้เป็นการประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งได้อีกด้วย แต่ในปัจจุบันนี้แผง PV/T ยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนนั้นต่ำกว่าการติดตั้งทั้ง 2 ระบบแยกกัน นอกจากนี้ตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T แบบทั่วไปนั้นมีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำเมื่อเทียบกับพลังงานที่ต้องใช้ในการระบายความร้อนดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) ด้วยการติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนในตัวเก็บความร้อนซึ่งจะทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำที่ไหลส่งผลให้การดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงขึ้น โดยในการศึกษาได้แบ่งเป็นการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบ ด้วยการทดลองจากครีบบ 14 รูปแบบและลักษณะการติดครีบบทั้งในช่องการไหลแบบขนาน (Parallel Channel) และช่องการไหลแบบวกกลับ (Serpentine Channel) การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลผ่านครีบบ โดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15 (Fluent) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ อธิบายผลการทดลองและสรุปหาเงื่อนไขรูปแบบครีบบและลักษณะการติดตั้งครีบบที่ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด เพื่อนำไปใช้กับตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T และสุดท้ายเป็นการศึกษาอุณหภูมิของแผง กำลังไฟฟ้าผลิต ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนจากการทดสอบแผง PV/T เทียบกับแผง PV แบบทั่วไปที่ใช้อ้างอิง โดยได้ทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริงเพื่อสรุปประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบที่พัฒนาขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ออกแบบและพัฒนาระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ใช้กับแผง PV/T สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ
- (2) ศึกษารูปแบบของครีบบและลักษณะช่องบังคับการไหลที่ส่งผลต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนระหว่างพื้นผิวและน้ำและนำมาใช้กับตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T
- (3) ศึกษาผลจากการติดครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนในตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T ที่มีต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนภายในระบบ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ออกแบบและสร้างระบบระบายความร้อนแบบบังคับ (Active cooling) สำหรับแผง PV/T โดยใช้น้ำเป็นของไหลในการระบายความร้อนและนำความร้อนที่ได้ไปผลิตน้ำร้อน
- (2) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบแบบตั้งฉากกับการไหล ครีบบแบบเอียงทำมุมกับการไหล ครีบบรูปตัววี ทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous rib) และไม่ต่อเนื่อง (Broken rib) ในช่องบังคับการไหลแบบขนาน (Parallel channel) และช่องบังคับการไหลแบบวกกลับ (Serpentine channel) โดยการถ่ายภาพทางความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด (IR camera) และวัดการสูญเสียความดันในระบบด้วยทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer)
- (3) ศึกษาลักษณะการไหลของน้ำผ่านครีบบแต่ละรูปแบบโดยใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent)
- (4) ออกแบบและสร้างชุดทดสอบแผง PV/T โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน (Polycrystalline silicon) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและติดตั้งตัวเก็บความร้อนที่ภายในมีครีบบสร้างความปั่นป่วนและช่องบังคับการไหลให้กับแผง PV/T เปรียบเทียบอุณหภูมิของแผง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา ค่าฉนวนประสิทธิภาพของระบบและเปรียบเทียบกับแผง PV ที่ใช้อ่างอิงโดยการทดสอบที่สภาวะใช้งานจริง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนให้กับแผง PV/T ที่ใช้น้ำเป็นของไหลระบายความร้อนและได้ต้นแบบแผง PV/T ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถผลิตทั้งไฟฟ้าและน้ำร้อนได้
- (2) ลดปัญหาการใช้พลังงานที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้สามารถช่วยลดภาวะโลกร้อนและปัญหาทางมลพิษในปัจจุบันได้
- (3) ลดระยะเวลาต้นทุนในการติดตั้งแผง PV/T

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่จะนำไปใช้ในงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็นส่วนหลักๆ ได้แก่ การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า แผง PV/T ทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนด้วยครีบบสร้างความปั่นป่วน นอกจากนี้ได้มีการทบทวนเอกสารและสถิติบัตรที่เกี่ยวข้องทั้งในเรื่องของการลดอุณหภูมิให้กับแผง PV และครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน

#### 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงและไม่มีวันหมด พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด ปราศจากอันตรายและมลพิษสามารถประยุกต์ใช้ได้ในทุกพื้นที่ พลังงานจากดวงอาทิตย์เกิดจากกระบวนการนิวเคลียร์ที่เรียกว่า นิวเคลียร์ฟิวชั่น กระบวนการนี้เป็นผลจากการรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนและกลายเป็นอะตอมฮีเลียม โดยมีมวลอะตอมไฮโดรเจนบางส่วนเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกส่งออกไปรอบดวงอาทิตย์ พลังงานที่ดวงอาทิตย์สร้างขึ้นมีค่าประมาณ  $3.8 \times 10^{23}$  kW แต่เนื่องจากระยะห่างจากดวงอาทิตย์ถึงโลกมีค่า 93 ล้านไมล์และผลจากการถูกดูดซับด้วยชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลกอยู่ที่ประมาณ  $1000 \text{ W/m}^2$  หากพิจารณาว่าระยะเวลาที่โลกได้รับแสงอาทิตย์ในหนึ่งวันอยู่ที่ 4-5 hr ดังนั้นสามารถคิดว่าค่าพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์จะอยู่ที่ 4-5 kW-hr/m<sup>2</sup>-day [3]

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานรูปแบบต่างๆบนโลก ทั้งพลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานคลื่น ชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แนวทางด้วยกัน คือ การใช้ประโยชน์โดยตรง ได้แก่ การใช้ประโยชน์รูปของแสงสว่างและการใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อน สำหรับการใช้อย่างอ้อมโดยนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ เช่น การผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งในปัจจุบันมีการคิดค้นวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ได้แก่ การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และการพัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น



### 2.1.1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

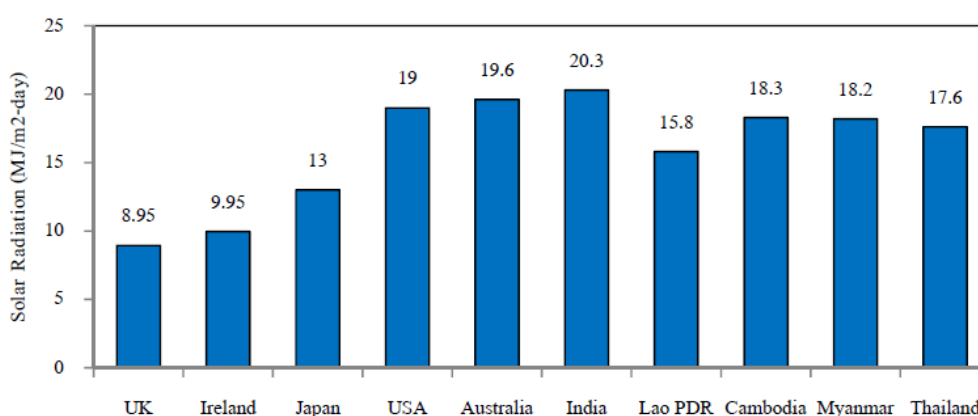
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์และจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมของประเทศไทย โดยวิเคราะห์ข้อมูลดาวเทียมประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดภาคพื้นดิน พบว่าค่าความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยของประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ  $18 \text{ MJ/m}^2$  ถ้านำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นที่ของประเทศไทยเพียงหนึ่งในร้อยส่วนของพื้นที่ทั้งหมดมาพิจารณาก็จะได้พลังงานเทียบเท่าการบริโภคน้ำมันดิบ  $8,000,000 \text{ tons/year}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีศักยภาพที่สามารถพัฒนาเป็นพลังงานหลักได้ในอนาคต [4]



รูปที่ 2.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี [4]

จากค่าความเข้มแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยตลอดปีซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี จะเห็นว่าการกระจายความเข้มแสงอาทิตย์ของทุกภาคทั่วประเทศไทยมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ของทุกภาคอยู่ในช่วง  $17\text{-}20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$

โดยบริเวณภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศจะมีพื้นที่ที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงในช่วง 20-22 MJ/m<sup>2</sup>-day ปรากฏเป็นบริเวณกว้างครอบคลุมพื้นที่จังหวัด สิงห์บุรี ลพบุรี อ่างทอง สุรินทร์ อุบลราชธานี ศรีสะเกษ บุรีรัมย์ ร้อยเอ็ด และเมื่อทำการคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทยในทุกพื้นที่พบว่า มีค่าเท่ากับ 17.6 MJ/m<sup>2</sup>-day และเมื่อนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากประเทศอื่นๆดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของประเทศต่างๆ [4]

### 2.1.2 การประยุกต์นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์

ประเทศไทยรู้จักการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานาน การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในรูปแบบของพลังงานปรมาณู ได้แก่ การตากแห้ง การทำนาเกลือ การถนอมอาหารและผลิตผลทางการเกษตร แต่ปัจจุบันประเทศไทยได้พัฒนาการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้เป็นพลังงานขั้นสุดท้ายใน 2 แนวทาง คือ การประยุกต์ใช้ทางความร้อนและการประยุกต์ใช้ทางไฟฟ้า

#### (1) การประยุกต์พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ทางความร้อน

การนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์แท้จริงแล้วเป็นการใช้พลังงานชนิดนี้โดยตรง แต่เพราะความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวโลกมีค่าไม่สูงนัก ดังนั้นจึงเกิดอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับหรือรวมแสงอาทิตย์แล้วนำความร้อนที่สะสมไว้มาใช้ประโยชน์ เรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) และเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่แปรผันตามเวลา (Time dependent energy resource) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีหน่วยเก็บสะสมพลังงาน (Energy storage) ติดตั้งเข้ากับระบบเพื่อให้สามารถนำความร้อนมาใช้ในยามที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ตัวอย่างเทคโนโลยีที่นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ทางความร้อน เช่น ระบบผลิตน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

## (2) การประยุกต์พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้า

การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยกระบวนการโฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic conversion) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ อาทิ ซิลิกอน ถูกนำมาใช้ในการรับแสงอาทิตย์ที่มีอนุภาคโฟตอน (Proton) เป็นส่วนประกอบ เมื่ออนุภาคโฟตอนกระทบผิวของเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการถ่ายเทพลังงานไปยังอิเล็กตรอน (Electron) ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแรงดึงดูดของอะตอม แล้วเคลื่อนที่ครบวงจรจนเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น สำหรับอีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมคือ การสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์แล้วใช้ความร้อนที่ได้นั้นมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเรียกว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน (Solar thermal conversion) ซึ่งจะใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์สร้างเป็นไอน้ำหรือลมร้อนแล้วนำมาปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในส่วนของระบบผลิตน้ำร้อน และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic conversion) เนื่องจากเป็นระบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและเป็นที่ยอมรับใช้งานในปัจจุบัน

## 2.2 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system, SWHS) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เป็นอุปกรณ์ในการแปลงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังเพื่อใช้งานต่อไป ซึ่งการใช้ระบบผลิตและน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะแตกต่างจากระบบพลังงานทดแทนชนิดอื่นคือ ความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมงนั้นมีค่าไม่คงที่และในแต่ละเดือนก็แตกต่างกัน ดังนั้นจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 4-6 hr/day ตั้งแต่เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป [5]

### 2.2.1 รูปแบบของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

รูปแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งตามลักษณะการไหลเวียนของน้ำที่ผ่านตัวเก็บความร้อนจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Passive) และระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ (Active)

## (1) ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ

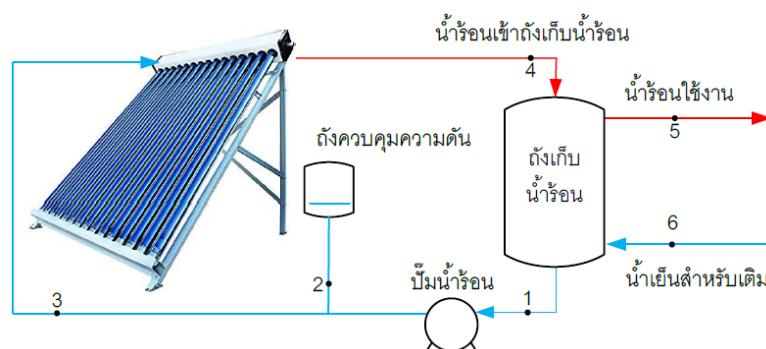
ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Passive solar water heating system) หรือในบางครั้งนิยมเรียกว่า เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) มีแผนภาพการทำงานอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีหลักการการทำงาน คือ น้ำเย็นไหลเข้าทางด้านล่างของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ในจุดที่ 1 เพื่อไปรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นในจุดที่ 2 จากนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นปริมาตรเพิ่มขึ้นแต่มีความหนาแน่นลดลงจะเคลื่อนตัวขึ้นไปยังถังเก็บน้ำร้อนและน้ำเย็นที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะถูกแรงโน้มถ่วงของโลกดึงดูดให้เคลื่อนที่มาทดแทนน้ำร้อนในตัวเก็บความร้อนเป็นวัฏจักรต่อเนื่อง และสำหรับน้ำร้อนที่จะถูกนำไปใช้งานจะอยู่ในจุดที่ 3 และเติมน้ำทดแทนน้ำร้อนที่ถูกนำไปใช้ในจุดที่ 4



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ [5]

## (2) ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ (Active solar water heating system) มีหลักการการทำงานคือ น้ำจะถูกปั๊มเข้าส่วนด้านล่างของถังเก็บน้ำร้อนในจุดที่ 1 แล้วไหลเข้าสู่ด้านบนของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ในจุดที่ 3 โดยใช้ปั๊มน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนของไหลในระบบ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปริมาตรของน้ำขยายตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในระบบจึงมีการติดตั้งถังควบคุมความดัน (Expansion tank) ไว้ในจุดที่ 2 เพื่อให้ปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นนั้นถูกเก็บไว้ในถังควบคุมความดันก่อนและเมื่อน้ำมีอุณหภูมิลดลงปริมาตรของน้ำจะลดลงเช่นกัน ถังควบคุมความดันจะดันมวลน้ำดังกล่าวกลับเข้าสู่ระบบเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในระบบ ในส่วนของน้ำที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำจะสูงขึ้นและไหลไปยังถังเก็บน้ำร้อนในจุดที่ 4 เมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงเพียงพอต่อการใช้งาน น้ำร้อนดังกล่าวจะถูกจ่ายไปยังตำแหน่งใช้งานในจุดที่ 5 และมีการเติมน้ำเย็นกลับเข้าสู่ระบบในจุดที่ 6 รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ



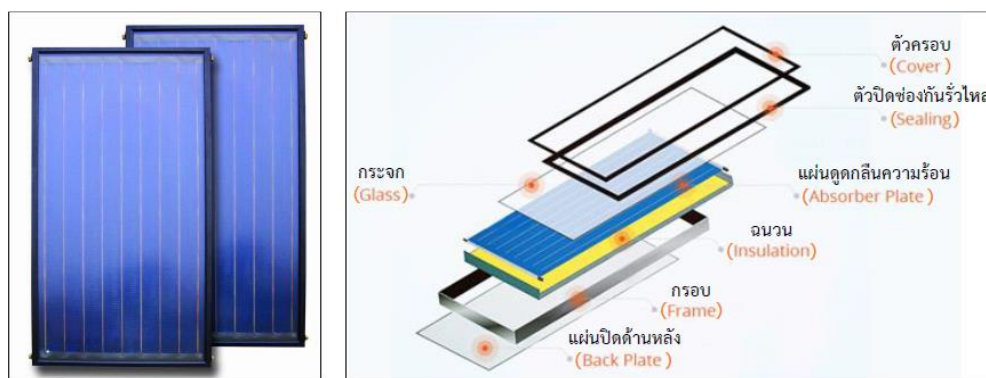
รูปที่ 2.4 แผนภาพหลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลบังคับ [5]

## 2.2.2 ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับของไหลที่ไหลภายในตัวเก็บความร้อนนั้นทำให้อุณหภูมิของไหลดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตัวเก็บความร้อนที่ดีจะต้องมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงและสูญเสียความร้อนน้อย นอกจากนั้นต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่ดูดกลืนให้แก่ของไหลได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์จะยึดติดอยู่กับที่และหันหน้าไปทางทิศใต้โดยเอียงทำมุมประมาณละติจูดของตำแหน่งที่ติดตั้ง ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

### (1) ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

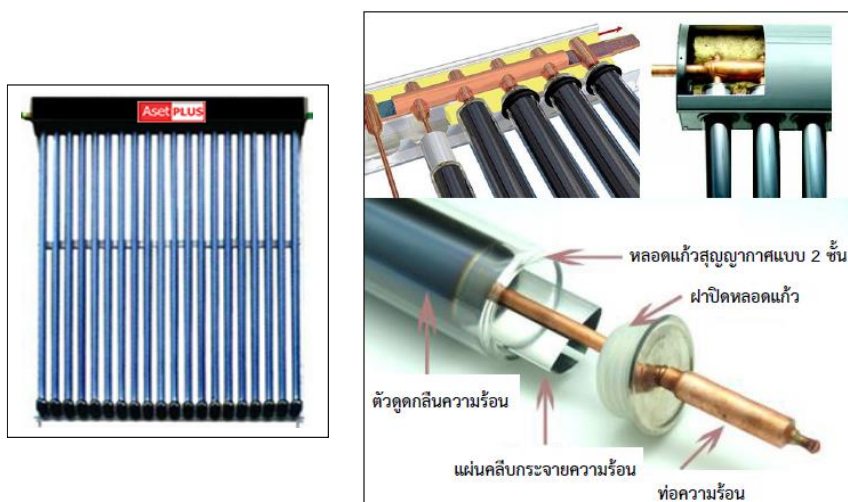
ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat plate solar collector) ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 กระจกแบบแผ่นเรียบปิดคลุมด้านบนทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์เข้าสู่ภายในตัวเก็บความร้อน จากนั้นแสงจะกระทบแผ่นดูดกลืนความร้อนซึ่งทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่สูง เช่น แผ่นโลหะเคลือบสีดำ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นดูดกลืนความร้อนแสงจะเปลี่ยนความยาวคลื่นกลายเป็นความร้อน ทำให้แผ่นดูดกลืนความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้แก่ท่อทองแดงที่ติดตั้งด้านบนของแผ่นโลหะ โดยแผ่นโลหะจะเคลือบสีดำเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่ น้ำที่ถูกจ่ายเข้าสู่ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบเรียบผ่านท่อทองแดงเหล่านี้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์สูญเสียให้แก่สิ่งแวดล้อม จึงมีอุปกรณ์ต่างๆ ประกอบไปด้วย ตัวครอบ ตัวปิดช่องกันรั่วไหล กรอบ ฉนวนกันความร้อนและแผ่นปิดด้านหลัง เพื่อปิดกั้นการรั่วไหลของอากาศร้อนภายในตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ออกไปยังภายนอก



รูปที่ 2.5 ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ [5]

### (2) ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube solar collector) จะมีการนำท่อความร้อน (Heat pipe) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทหนึ่ง มาประยุกต์ในการผลิตน้ำร้อน โดยท่อความร้อนจะบรรจุสารทำงานที่มีจุดเดือดต่ำไว้ภายในเพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังน้ำร้อน ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีหลักการทำงานคือ แสงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ผ่านหลอดแก้วสุญญากาศด้านนอกมากระทบกับตัวดูดกลืนความร้อนที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางสีดำเพื่อเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน เมื่อตัวดูดกลืนความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะถ่ายเทความร้อนโดยกระบวนการนำความร้อนผ่านครีบกกระจายความร้อนที่ทำจากโลหะที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนสูงเพื่อนำความร้อนไปยังท่อความร้อน สาเหตุหลักที่ต้องมีการติดตั้งแผ่นครีบกกระจายความร้อนเนื่องจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างหลอดแก้วด้านนอกกับท่อความร้อนจะถูกดูดอากาศออกจนหมดกลายเป็นสุญญากาศและทำการปิดกั้นอากาศรั่วไหลเข้าไปในพื้นที่ช่องว่างดังกล่าวด้วยฝาปิดหลอดแก้ว ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนได้เนื่องจากไม่มีอากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อน จึงต้องนำโลหะมาเป็นตัวกลางในกระบวนการนำความร้อนจากตัวดูดกลืนความร้อนไปยังท่อความร้อน จากนั้นความร้อนที่ไปสัมผัสกับผิวท่อความร้อนจะเกิดกระบวนการนำความร้อนผ่านผิวท่อทองแดงไปยังสารทำงานด้านในและทำให้สารทำงานเดือดกลายเป็นไอเคลื่อนที่ไปยังส่วนบนของท่อความร้อน จากนั้นท่อความร้อนจะต่อกันแบบอนุกรมโดยใช้ชุดยึดท่อความร้อน ซึ่งน้ำที่ต้องการนำมาเพิ่มอุณหภูมิจะถูกจ่ายเข้าสู่ท่อทองแดงของชุดยึดท่อความร้อนเพื่อรับความร้อนจากไอของสารทำงาน สารทำงานจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลกลับไปยังด้านล่างของท่อความร้อนเพื่อรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ต่อไป ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

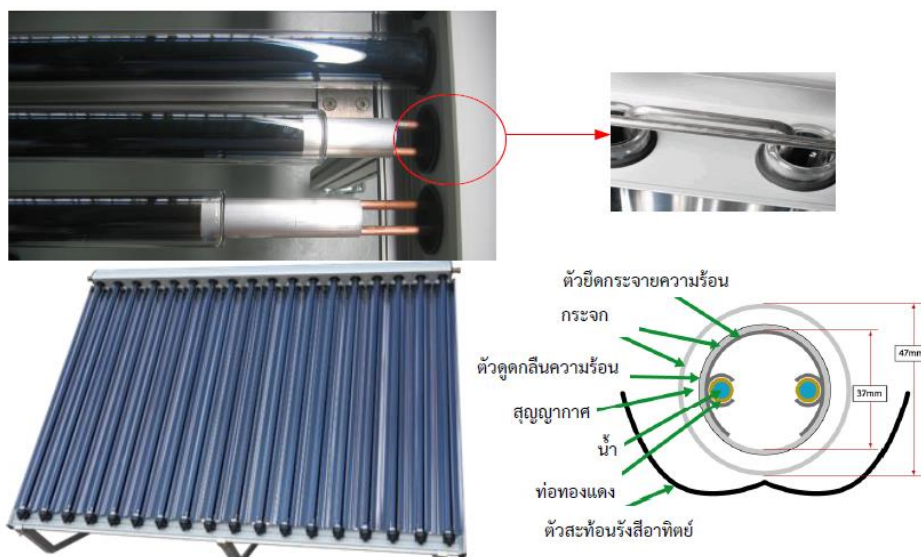


รูปที่ 2.6 ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ [5]

(3) ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงท่อสุญญากาศ

ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงท่อสุญญากาศ (Compound parabolic concentrating evacuated tube solar collector, CPC) มีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ แต่มีตัวสะท้อนรังสีอาทิตย์บริเวณด้านหลังเพื่อสะท้อนแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านพื้นที่ระหว่างท่อแก้วสุญญากาศให้สะท้อนกลับมากระทบท่อแก้วสุญญากาศอีกครั้ง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ ทั้งนี้ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงท่อสุญญากาศที่มีการผลิตเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มีการออกแบบท่อความร้อนภายในหลอดแก้วสุญญากาศแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 ใช้ท่อความร้อนที่บรรจุสารทำงานในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ เหมือนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศซึ่งมีใช้งานค่อนข้างน้อยเนื่องจากราคาสารทำงานที่บรรจุในหลอดแก้วสุญญากาศมีราคาค่อนข้างสูงทำให้ราคาของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์สูงตามไปด้วยรวมทั้งมีโอกาสเกิดการรั่วไหลของสารทำงาน ดังนั้นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงท่อสุญญากาศแบบที่ 2 จึงใช้น้ำวิ่งเข้าสู่หลอดแก้วสุญญากาศแทนการใช้สารทำงานสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมในการผลิตความร้อนอุณหภูมิสูงมากกว่า 120 °C





รูปที่ 2.7 ตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์แบบรางรวมแสงท่อสุญญากาศ [5]

### 2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้ใน 2 วิธีด้วยกัน คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic conversion) และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีทางความร้อน (Solar thermal conversion) ซึ่งในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลเทอิกซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวรับและแปลงพลังงานนั้น ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางเนื่องด้วยระบบที่ง่ายไม่ความซับซ้อนและต้นทุนในการติดตั้งที่ถูกลง

กระบวนการโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic conversion) เป็นกระบวนการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน กระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) มีพลังงานสูงขึ้นและหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างของแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำไฟฟ้าส่งผลให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้

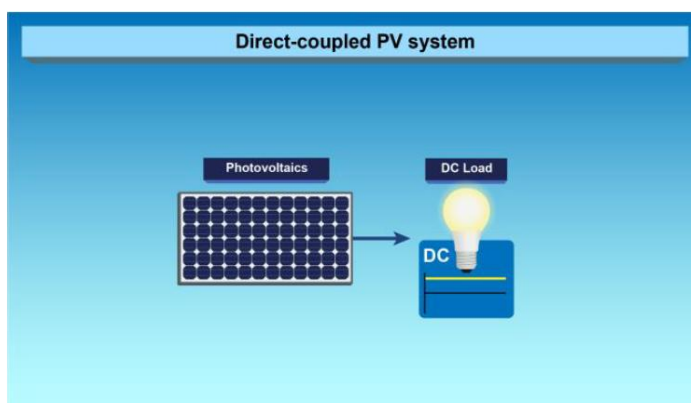
#### 2.3.1 รูปแบบระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ตามแหล่งที่มาของพลังงานไฟฟ้าได้แก่ ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand alone system) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PV grid connected system) และระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)

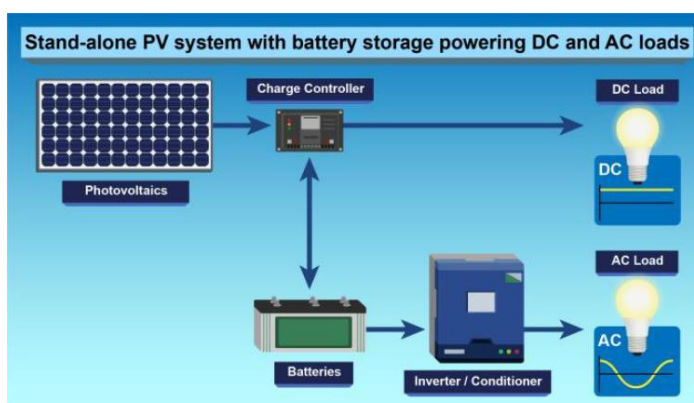


## (1) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand alone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.8 อุปกรณ์ของระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งต่อใช้งานโดยตรงกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงหรืออีกรูปแบบหนึ่งคือ นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อให้ได้แรงดันตามความต้องการของอุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Solar charge controller) ซึ่งต่ออยู่ถัดมาและกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการใช้งานของโหลด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ควบคุมการประจุสามารถนำไปใช้งานโดยการต่อกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงและในขณะเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่เหลือก็สามารถนำไปชาร์จเข้าแบตเตอรี่ (ควรเลือกใช้เป็นแบตเตอรี่แบบ Deep cycle) ถัดมาเป็นอุปกรณ์แปลงผันพลังงานเพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ โดยโหลดที่ใช้จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



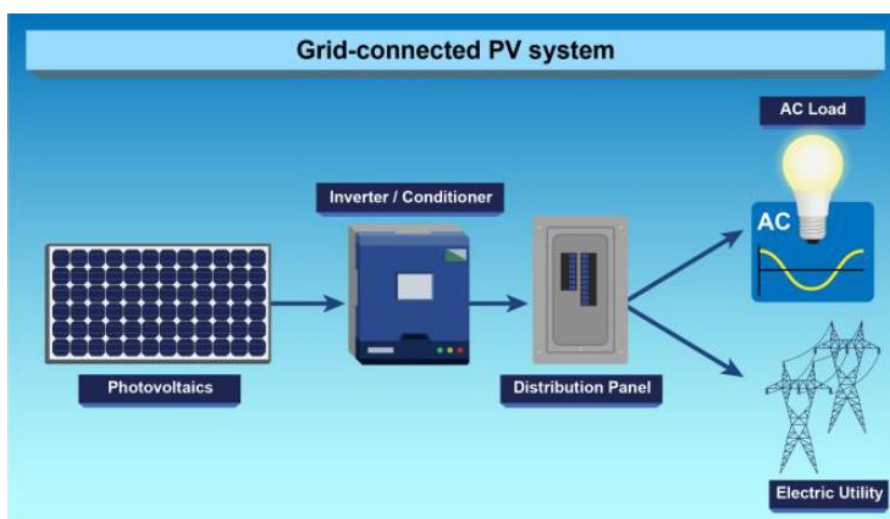
รูปที่ 2.8 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่จ่ายโหลดโดยตรง [6]



รูปที่ 2.9 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ [6]

## (2) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

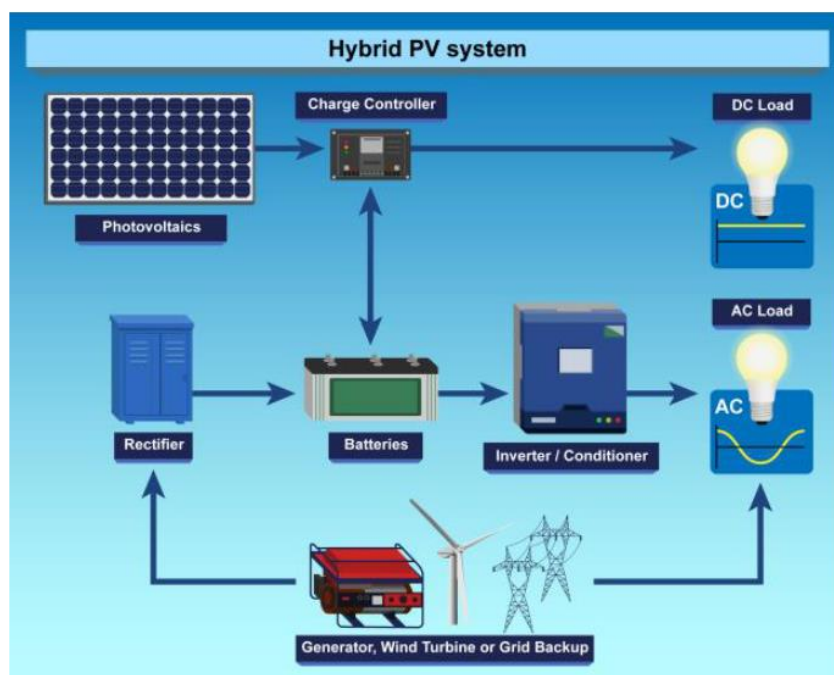
ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PV grid connected system) ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.10 อุปกรณ์สำคัญของระบบประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งนำมาต่อให้ได้แรงดันตามความต้องการของอินเวอร์เตอร์โดยต่อผ่านกล่องต่อสายและเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการใช้งานของโหลด ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยการต่อกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงทันทีหรือแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ในขณะเดียวกันก็สามารถต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าผ่านสวิตช์ตัดตอนและมีเตอร์ kW-hr โดยระบบผลิตไฟฟ้ารูปแบบนี้ใช้เหมาะสำหรับในพื้นที่เขตตัวเมืองหรือมีระบบโครงข่ายไฟฟ้าเข้าถึง



รูปที่ 2.10 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า [6]

## (3) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

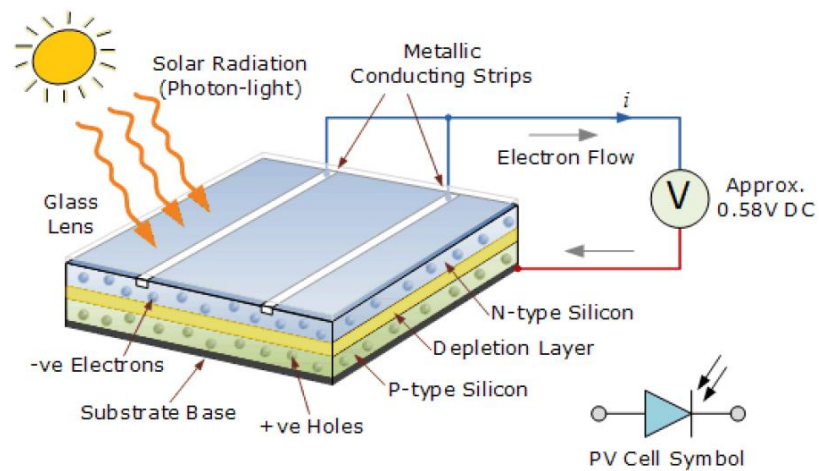
ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าชนิดอื่นๆ อุปกรณ์ของระบบที่สำคัญประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งนำมาต่อให้ได้แรงดันตามความต้องการของอุปกรณ์แปลงผันพลังงานแบบผสมผสาน (Hybrid inverter) โดยสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาทิ กังหันลมและแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้อาจจะนำไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ 230 V และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้อีกด้วย



รูปที่ 2.11 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน [6]

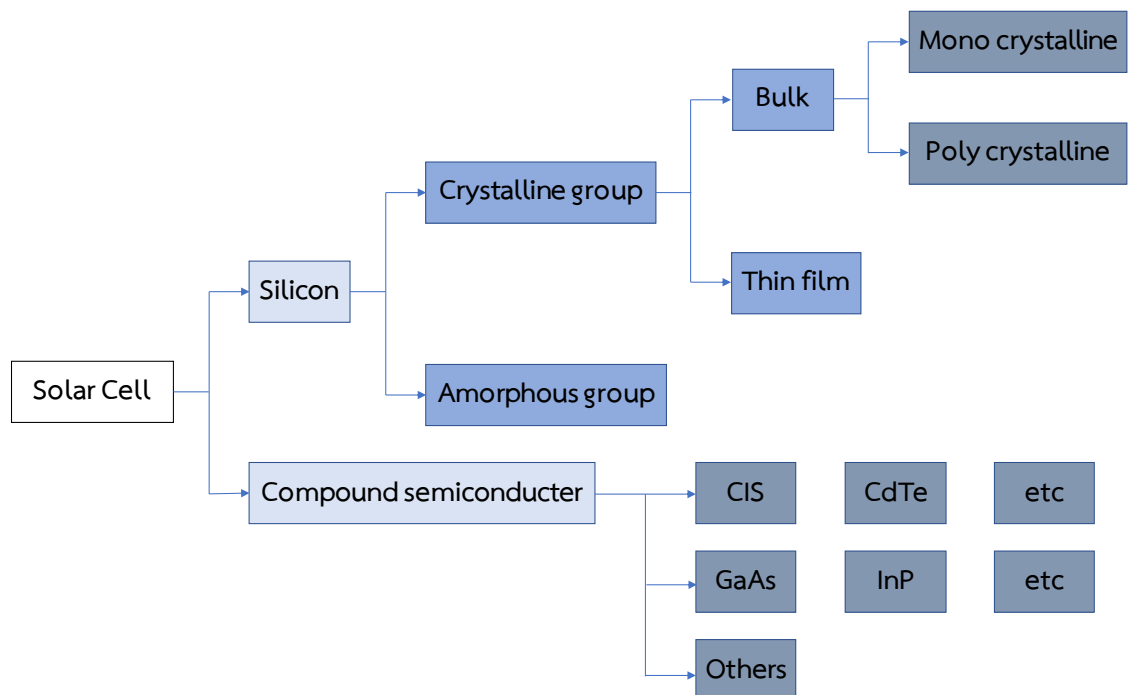
### 2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกและมากที่สุดบนพื้นโลก(ทราย) นำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์โดยในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์นั้น รังสีของแสงซึ่งมีอนุภาคของที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกจากรังสีของอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจรก็จะทำให้เกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 (พ.ศ. 2497) โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียสัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction) แบบใหม่โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิคอนจนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลกซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 15% ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศก็ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าต่อมาจึงได้มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลกเช่นในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาแต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่าง ๆ กันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียวและทองเพื่อความสวยงามเป็นต้น หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (Silicon Semiconductor) และกลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบผสม (Compound Semiconductor) ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการแบ่งชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

## (1) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน (Mono Crystalline silicon) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ที่เก่าแก่ที่สุดและมีราคาแพง แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงโดยทั่วไปแล้วมีความสามารถในการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าได้ถึง 15-20% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนทำจากผลึกเดี่ยวของซิลิกอนบริสุทธิ์พิเศษขนาดประมาณขวดไวน์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) และหั่นเป็นแผ่นบางๆ เพื่อทำการเวเฟอร์แล้วจะถูกเปลี่ยนเป็น "เซลล์แสงอาทิตย์" เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข)



(ก) ผลึกเดี่ยวของซิลิกอนบริสุทธิ์ (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน  
รูปที่ 2.14 ลักษณะของก้อนผลึกซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน [6]

จากรูปที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน เส้นสีเงินเป็นลวดตัวนำซึ่งทำหน้าที่รวบรวมกระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อแสงกระทบกับเซลล์ย่อย เมทริกซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ที่วางต่อกันในแนวราบมีลักษณะเหมือนแผ่นกระเบื้องโดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนจะมีประสิทธิภาพสูงแต่จะเสียพื้นที่บางส่วนระหว่างเซลล์เมื่อถูกนำมาประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน



รูปที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน [6]

### ข้อดีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน มีประสิทธิภาพสูงสุดเนื่องจากทำจากซิลิกอนเกรดสูงสุด โดยประสิทธิภาพของแผงชนิดโมโนคริสตัลไลน์โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 15-20%
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนจะประหยัดพื้นที่ เนื่องจากแผงชนิดนี้ผลิตพลังงานสูงสุดจึงใช้พื้นที่จำนวนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 4 เท่าของปริมาณการผลิตไฟฟ้าเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเมื่อเทียบในพื้นที่ติดตั้งเท่ากัน
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน มีอายุการใช้งานนานที่สุดซึ่งผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะรับประกันที่ 25 ปี
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน มีแนวโน้มที่จะทำงานได้ดีกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนที่ติดตั้งในพิกัดเดียวกันเมื่อความเข้มแสงน้อย

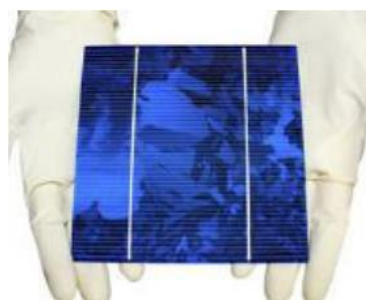
### ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนนั้นมีราคาแพงที่สุดจากมุมมองด้านความคุ้มค่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนและชนิดฟิล์มบาง(บางกรณี)อาจเป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับผู้ติดตั้งบางราย
- หากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกปกคลุมด้วยเงา ฝุ่น หรือหิมะบางส่วน วงจรทั้งหมดอาจเสียหายได้ ต้องใช้ไมโครอินเวอร์เตอร์ซึ่งติดตั้งเฉพาะแผงแทนอินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่จึงจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ เนื่องจากปัญหาการบดบังของเงาจะได้รับผลกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงเดียวเท่านั้น
- กระบวนการดึงผลึกซิลิกอน (Czochralski) ในการผลิตโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน ส่งผลให้ได้แท่งทรงกระบอกขนาดใหญ่ โดยที่ด้านข้างจะถูกตัดออกจากแท่งทรงกระบอกเพื่อสร้างแผ่นเวเฟอร์ซิลิกอน ซิลิกอนที่เหลือจากการตัดจำนวนมากจะกลายเป็นขยะ
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ มีความเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพต่ออุณหภูมิที่สูง โดยเมื่ออุณหภูมิของแผงสูงขึ้นประสิทธิภาพของแผงจะลดลงมากกว่าชนิดอื่นๆ



## (2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน (Poly crystalline silicon) ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเช่นกัน แต่ชนิดของซิลิกอนที่เลือกใช้นั้นบริสุทธิ์น้อยกว่าชนิดโมโนคริสตัลไลน์เล็กน้อยและถูกหล่อเป็นบล็อกแทนที่จะเป็นรูปผลึกเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ผลึกจะถูกจัดเรียงแบบสุ่มมองเห็นเป็นผลึกย่อยๆ เมื่อก่อนโพลีคริสตัลไลน์หล่อจนเสร็จสิ้นมันจะถูกเลื่อยเป็นบล็อกสี่เหลี่ยม จากนั้นหั่นเป็นเวเฟอร์สี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้วถูกเปลี่ยนให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์คล้ายกับชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ในด้านประสิทธิภาพและการเสื่อมสภาพ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์โดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าไม่มีการเสียพื้นที่ระหว่างมุมของเซลล์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งหมายความว่าเมื่อนำมาสร้างเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้มีพื้นที่เพิ่มเติมเล็กน้อยเพื่อดูดซับแสงแดด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ผลที่ได้คือประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์นั้นเกือบจะเทียบเท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์



(ก) ผลึกโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน

รูปที่ 2.16 ลักษณะของก้อนผลึกซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน [6]



รูปที่ 2.17 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน [6]

ข้อดีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน

- กระบวนการที่ใช้ในผลิตโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนนั้นง่ายกว่าและเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า นอกจากนั้นปริมาณของเสียยังน้อยกว่าชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอนอีกด้วย
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนมีแนวโน้มที่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากความร้อนต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน ในทางเทคนิคหมายความว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ทำงานได้แย่น้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ในอุณหภูมิสูง โดยความร้อนจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนเพียงเล็กน้อย

ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์

- ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์อยู่ที่ 13-16% เนื่องจากความบริสุทธิ์ของซิลิกอนที่ต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน
- ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน

(3) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์และชนิดโพลีคริสตัลไลน์ถูกผลิตขึ้นในลักษณะที่คล้ายกันมาก แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film) ใช้วิธีการผลิตที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิง โดยแทนที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการเลื่อยซิลิกอนก้อนใหญ่ ฟิล์มที่มีซิลิกอนผสมอยู่จะถูกล้าง "พ่น" ไปยังพื้นผิวซึ่งจะทำให้กลายเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แม้ว่ากระบวนการเหล่านี้จะมีมาระยะหนึ่งแล้วแต่กระบวนการผลิตฟิล์มบางเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ โดยได้มีการประมาณอายุการใช้งานของแผงชนิดนี้อยู่ที่ 20 ปี โดยฟิล์มบางเป็นคำทั่วไปสำหรับเรียกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุเหล่านี้คือ ซิลิคอนที่ไม่เป็นรูปผลึก (a-Si) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CIGS) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมีใช้อยู่ประมาณ 5% ในท้องตลาดและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะได้รับความนิยมในโซลาร์ฟาร์มขนาดใหญ่แต่ไม่นิยมในตลาดที่อยู่อาศัย ถึงแม้ว่าขั้นตอนการผลิตจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นแต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางก็มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 8-10% เท่านั้น ซึ่งหมายความว่ามันต้องมีขนาดใหญ่เป็นสองเท่าของชนิดโมโนคริสตัลไลน์และชนิดโพลีคริสตัลไลน์เพื่อให้ผลิตพลังงานได้เท่ากัน สิ่งที่ควรระวังอีกประการคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางสามารถเสื่อมสภาพลงได้ถึง 20% ในช่วงปีแรกของการติดตั้งก่อนที่จะคงตัวสู่ระดับการผลิตพลังงานที่กำหนด





(ก) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (ข) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

**รูปที่ 2.18** ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [6]

ข้อดีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

- การผลิตจำนวนมากนั้นทำได้ง่าย ทำให้มีราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลึก
- กำลังไฟฟ้าได้รับผลกระทบน้อยกว่าจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น
- ใช้วัสดุน้อยลงในการผลิตแผง ดูสะอาดและสามารถโค้งงอเป็นรูปร่างต่างๆ ได้
- สามารถทำงานได้ดีในสภาพแสงน้อยหรือมีเงาบังบางส่วน

ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

- มีประสิทธิภาพเพียงครึ่งหนึ่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก
- ใช้เวลาหกเดือนถึงหนึ่งปีก่อนที่ กำลังการผลิตไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพ
- ใช้เวลาในการติดตั้งนาน
- มีข้อจำกัด ในการเลือกใช้อินเวอร์เตอร์
- ใช้กระบวนการผลิตที่เป็นพิษมากขึ้น

(4) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบผสม

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบผสม (Compound Semiconductor) เซลล์ประเภทนี้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25% ขึ้นไป และมีราคาสูงมาก ไม่นิยมสำหรับนำมาใช้บนพื้นโลก แต่มีการใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ โดยกระบวนการพัฒนาการผลิตสมัยใหม่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาที่ถูกลงและสามารถนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต (ปัจจุบันมีการใช้เพียง 7% ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด) ซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนต่อไป

#### (5) คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

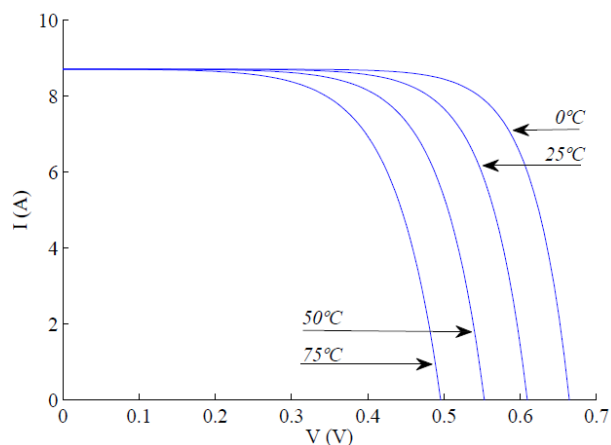
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หรืออัตราการแปลงผัน หมายถึง ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงรับเข้ามาและถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์จะอยู่ในช่วง 11-15% ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำไปใช้งานจริง ได้แก่ ความเข้มแสงและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์

##### ● ความเข้มแสง

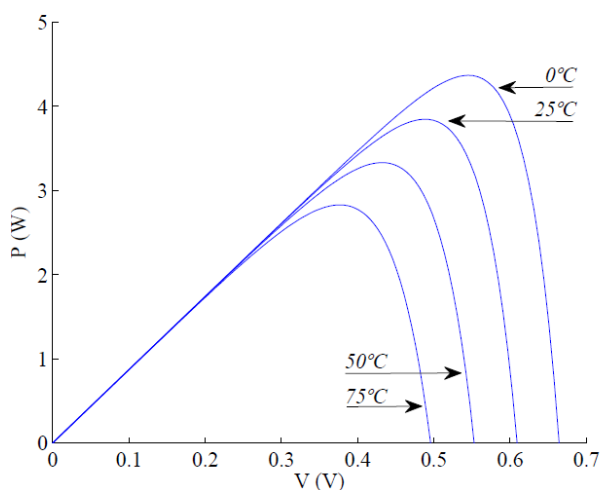
กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง (Intensity) หมายความว่า เมื่อความเข้มของแสงสูงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นด้วยหรืออีกนัยหนึ่งจะกล่าวว่า “กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสูงขึ้นแต่แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก” ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ตัวอย่างเช่น ความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม  $60^\circ$  กับพื้นโลกความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับประมาณ  $750 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเท่ากับ AM2 โดยกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง [6]

##### ● อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่แปรตามอุณหภูมิของเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป “แต่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้น” โดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ  $1^\circ\text{C}$  ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% ในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ที่อุณหภูมิเซลล์  $25^\circ\text{C}$  เช่น กำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open circuit voltage :  $V_{oc}$ ) ที่ 21 V ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า  $25^\circ\text{C}$  เช่น อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ( $0.5\% \times 5^\circ\text{C}$ ) นั่นคือแรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่วงจรเปิดจะลดลง 0.525 V ( $21 \text{ V} \times 2.5\%$ ) เหลือเพียง 20.475 V ( $21 \text{ V} - 0.525 \text{ V}$ ) สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย [6] ซึ่งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ 0 ถึง 75 °C [7]



รูปที่ 2.20 คุณลักษณะของกำลังและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ 0 ถึง 75 °C [7]

### 2.3.3 การคำนวณประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าทันทีที่มีแสงมาตกกระทบ โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$P_e = f(I_T, T_m) \quad (2.1)$$

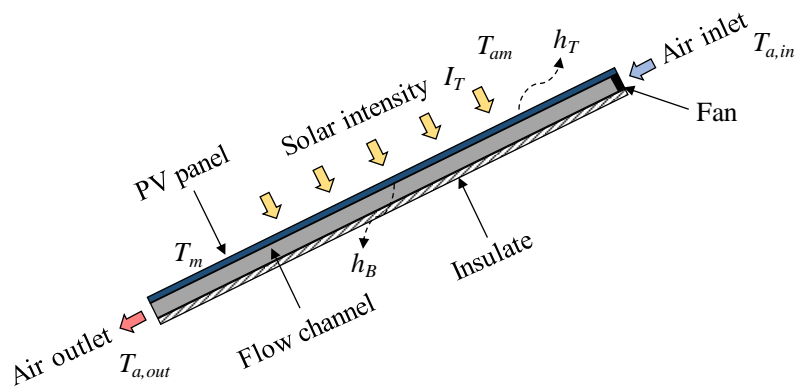
โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ( $P_e$ ) นั้นจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มของแสง ( $I_T$ ) และแปรผกผันกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T_m$ ) ซึ่งหากพิจารณารูปที่ 2.21 ด้วยสมดุลทางความร้อน

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าอุณหภูมิมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งแผงและไม่คิดพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในแผง [8] สมดุลพลังงานของแผงจะแสดงดังสมการ

$$I_T (\tau\alpha) A_{pv} = h_T A_{pv} (T_m - T_{am}) + h_B A_{pv} (T_m - T_{a,avg}) \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ} \quad T_{a,avg} = \frac{T_{a,in} + T_{a,out}}{2} \quad (2.3)$$

โดยเทอมทางซ้ายมือของสมการที่ 2.2 คือ พลังงานที่แผงได้รับจากแสงอาทิตย์ซึ่ง  $\tau\alpha$  คือ ผลคูณของค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนแสงอาทิตย์ของแผง (ขึ้นกับชนิดของแผง) และ  $A_{pv}$  คือ พื้นที่ผิวรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับเทอมทางขวามือของสมการ เทอมแรก คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านหน้าแผง (ผิวรับแสง) เนื่องจากการสัมผัสกับบรรยากาศโดยรอบ โดย  $h_T$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ด้านหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ  $T_{am}$  คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ต่อมาเทอมที่สอง คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดย  $h_B$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ  $T_{a,avg}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้าและออกจากระบบระบายความร้อน



รูปที่ 2.21 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน

หากพิจารณาการสูญเสียความร้อนที่ด้านหลังของแผงด้วยการถ่ายเทความร้อนจากระบบระบายความร้อนแบบบังคับโดยใช้อากาศไหลผ่านในช่องด้านหลังแผง และมีการหุ้มฉนวนด้านหลังช่องบังคับการไหลอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน จะได้ว่า

$$\dot{m}C_p (T_{a,out} - T_{a,in}) = h_B A_{pv} (T_m - T_{am}) \quad (2.4)$$

ดังนั้นสมดุลทางความร้อนสามารถเขียนได้ว่า

$$I_T(\tau\alpha)A_{pv} = h_T A_{pv}(T_m - T_{am}) + mC_p(T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (2.5)$$

$$I_T(\tau\alpha)A_{pv} - h_T A_{pv}(T_m - T_{am}) = mC_p(T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (2.6)$$

$$\frac{mC_p(T_{a,out} - T_{a,in})}{I_T A_{pv}} = (\tau\alpha) - \frac{h_T(T_m - T_{am})}{I_T} \quad (2.7)$$

โดยเทอมทางซ้ายของสมการอาจแปลงเป็นประสิทธิภาพทางความร้อน ( $\eta_{th}$ ) นั่นคือ

$$\eta_{th} = (\tau\alpha) - \frac{h_T(T_m - T_{am})}{I_T} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) ถ้าพล็อตตามความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_{th}$  และ  $h_T(T_m - T_{am})/I_T$  จะได้กราฟในลักษณะเส้นตรง โดยความชันของเส้นนั้นคือ  $-h_T$  และจุดตัดแกน  $\eta_{th}$  นั้นจะได้ค่า  $\tau\alpha$  ดังนั้นค่าของ  $h_B$  สามารถหาจากสมการ

$$h_B = \frac{I_T(\tau\alpha)A_{pv} - h_T A_{pv}(T_m - T_{am})}{(T_m - T_{am})} \quad (2.9)$$

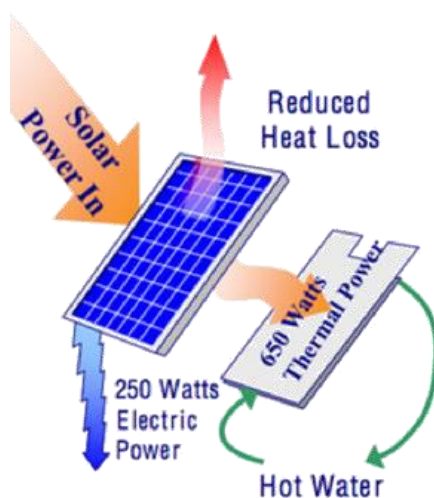
และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ( $\eta_e$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{el} = \frac{P_e}{I_T A_{pv}} \quad (2.10)$$

ซึ่งค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะขึ้นกับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.4 แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือแผง PV/T

การผลิตน้ำร้อนและกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปจำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ในการเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทไปยังน้ำในระบบเพื่อทำน้ำร้อน ขณะที่การผลิตกระแสไฟฟ้านั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผง PV (Photovoltaic panel) จะถูกติดตั้งเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งแผง PV ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าประมาณ 15% ที่อุณหภูมิแผง 25 °C แต่เนื่องจากการนำไปใช้งานจริงนั้น ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะเกิดขึ้นและสะสมอยู่ในแผงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เพื่อลดอุณหภูมิให้กับเซลล์แสงอาทิตย์และนำความร้อนที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์สูงสุด ตัวเก็บความร้อนจึงถูกผสมผสานเข้ากับแผง PV และทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับความร้อนโดยเรียกระบบดังกล่าวว่า “แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (Photovoltaic/Thermal panel) หรือ แผง PV/T ” ซึ่งการนำแผง PV/T ไปใช้นั้นจะสามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในแผงเดียวกัน ซึ่งนอกจากจะได้ประโยชน์จากพลังงานทั้งสองแล้วยังช่วยลดพื้นที่ในการติดตั้งระบบได้อีกด้วย รูปที่ 2.22 แสดงแนวคิดการทำงานของแผง PV/T และรูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างระบบแผง PV/T ที่สามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและน้ำร้อนในระบบเดียวกัน



รูปที่ 2.22 แนวคิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผง PV/T [9]



รูปที่ 2.23 ระบบแผง PV/T ที่ติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน [9]

#### 2.4.1 การคำนวณประสิทธิภาพของแผง PV/T

เนื่องจากแผง PV/T สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากการรับแสงอาทิตย์ ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงจึงสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (Electrical efficiency, ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงผลิตได้หารด้วยผลคูณของค่าความเข้มแสงกับพื้นที่ผิวรับแสงของแผง PV/T ณ เวลานั้น ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของ PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$\eta_{el} = \frac{P}{I_T A_{pv}} \quad (2.11)$$

โดยที่  $P$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV/T (W)

$I_T$  คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ณ เวลาที่วัดกำลังไฟฟ้า ( $W/m^2$ )

$A_{pv}$  คือ พื้นที่ผิวรับแสงของแผง PV/T ( $m^2$ )

ซึ่งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าแผง PV ได้ในบางช่วงเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากน้ำที่กักเก็บไว้ส่งผลต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ที่มีค่าติดลบ หมายถึง การที่เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นลดลง

ในทำนองเดียวกันประสิทธิภาพทางความร้อนของโมดูลระบายความร้อน (Cooling module) ในแผง PV/T จะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์

(Solar collector) เนื่องจากค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของชั้นผิวที่เคลือบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูง และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorption factor) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวัสดุดำของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนที่สภาวะคงตัวของตัวเก็บความร้อนในแผง PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{w,out} - T_{w,in})}{I_T A_{PV}} \quad (2.12)$$

โดยที่  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของน้ำในตัวเก็บความร้อน (kg/s)  
 $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg·°C)  
 $T_{w,in}$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่ตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T (°C)  
 $T_{w,out}$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T (°C)

ในปัจจุบันการนำแผง PV/T มาใช้นั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากปัญหาด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนที่ยังต่ำกว่าการติดตั้งสองระบบแบบแยกออกจากกัน นอกจากนี้โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ยังมีความสามารถในการพาความร้อนต่ำ และใช้พลังงานในการปั๊มน้ำสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้คิดค้นแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) ที่ติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนเพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหลส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มายังน้ำในโมดูลระบายความร้อนสูงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำร้อนและลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยิ่งขึ้น

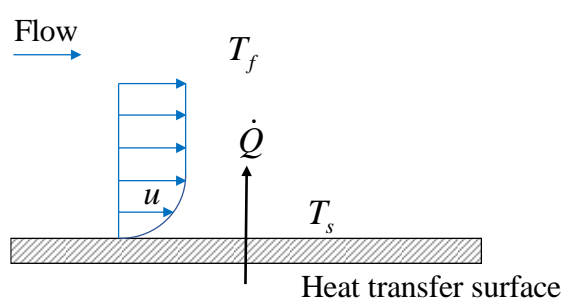
## 2.5 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คือ การถ่ายโอนความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งอันเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดทั้งสอง การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบตามลักษณะของตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน แต่โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ด้านความร้อนจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางที่เป็นของไหลกับพื้นผิว เช่น การให้ความร้อน (Heating) หรือ การระบายความร้อน (Cooling) ดังนั้นกระบวนการส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นหลัก



### 2.5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนด้วยตัวกลางที่เป็นของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเรียกว่า การพาความร้อน (Convection heat transfer) ความเร็วของของไหลที่ผ่านพื้นผิวร้อนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน พิจารณาจากรูปที่ 2.24 เมื่อ  $T_s$  เป็นอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนร้อนและ  $T_f$  เป็นอุณหภูมิของของไหล จากภาพจะแสดงให้เห็นความเร็วของของไหลที่มีค่าลดลงและเท่ากับศูนย์ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ติดแน่นกับพื้นผิวดังกล่าว ดังนั้น ความร้อนจึงถูกส่งผ่านด้วยการนำที่จุดนี้เพียงจุดเดียว



รูปที่ 2.24 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนจากพื้นผิวไปยังของไหล

เมื่อความร้อนไหลด้วยการนำในชั้นที่ความเร็วของของไหลเท่ากับศูนย์ จะสามารถพิจารณาเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพา ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิในชั้นนี้จะขึ้นกับความเร็วของการไหล หากความเร็วของการไหลมีค่าสูงจะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่มากยิ่งขึ้น ผลเนื่องจากการพาความร้อนทั้งหมดพิจารณาโดยใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

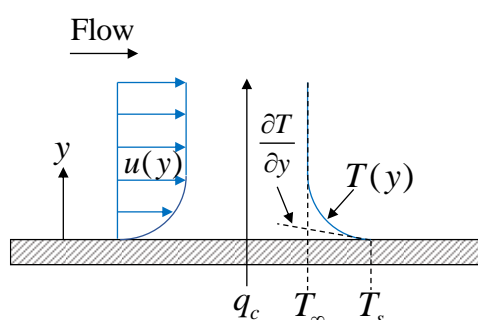
$$\dot{Q} = hA(T_s - T_f) \quad (2.13)$$

โดยที่	$\dot{Q}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวไปยังของไหลด้วยการพาความร้อน (W)
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ )
	$A$	คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ )
	$T_s$	คือ อุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (K)
	$T_f$	คือ อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (K)

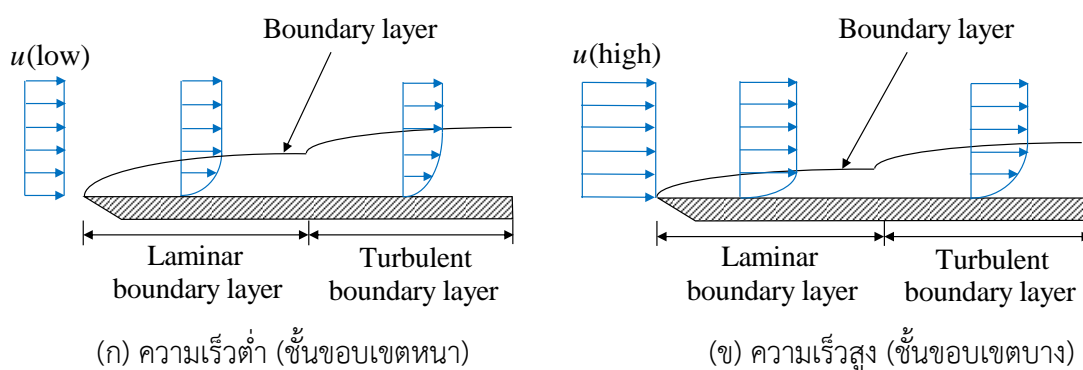
จากสมการที่ 2.13 หากต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $\dot{Q}$ ) สามารถทำได้สองวิธี คือ การเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ( $A$ ) ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับของไหล เช่น

การติดพื้น (Fins) บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งเหมาะกับงานที่ไม่คำนึงถึงขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์และอาจต้องใช้กำลังขับเคลื่อนมากขึ้น

ในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิต่ำไหลผ่านพื้นผิวร้อนที่อยู่นิ่งซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.25 ความหนืด (Viscosity) จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างต่อเนื่อง โดยบริเวณที่ใกล้พื้นผิวจะมีความเร็วต่ำและตำแหน่งที่ห่างจากพื้นผิวจะมีความเร็วสูงขึ้นจนถึงบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ โดยชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้เรียกว่า “ชั้นขอบเขต (Boundary layer)” โดยบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอหรือการไหลหลักอุณหภูมิของของไหลจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างของไหลกับพื้นผิว แต่ในบริเวณส่วนของชั้นขอบเขตจะเกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวตามระยะห่างของพื้นผิว จากสาเหตุนี้ของไหลที่มีความเร็วต่ำจะส่งผลให้ภายในชั้นขอบเขตมีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดีเสมือนชั้นขอบเขตเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ระหว่างของไหลกับพื้นผิวสามารถทำได้โดยการลดความหนาของชั้นขอบเขตด้วยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.26 แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วให้กับของไหลย่อมต้องเพิ่มกำลังของปั๊มซึ่งทำให้ระบบสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น

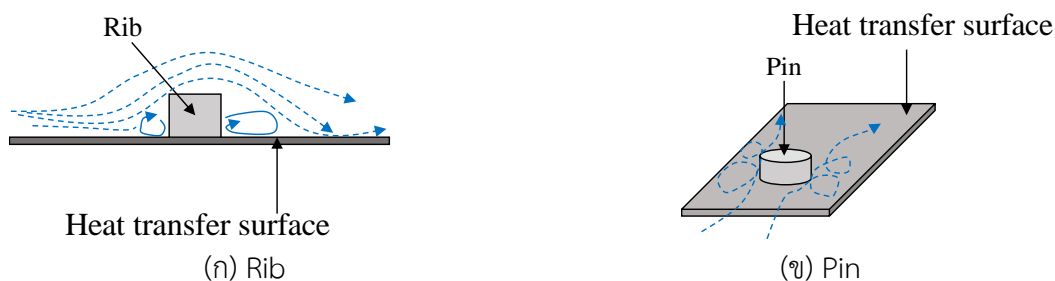


รูปที่ 2.25 อุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุของการพาความร้อนแบบบังคับ



รูปที่ 2.26 ชั้นขอบเขตของการไหลบนพื้นผิว

วิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) อีกวิธีหนึ่งคือ การทำลายชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้ง “ตัวสร้างความปั่นป่วน (Turbulator)” เช่น กลุ่มของครีบ (Ribs) หรือ พิน (Pins) บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวได้ เนื่องจากการไหลจะเกิดการหมุนวนเมื่อผ่านตัวสร้างความปั่นป่วนและทำให้ชั้นขอบเขตนั้นถูกทำลาย

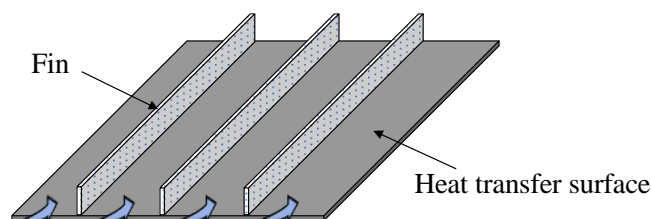


รูปที่ 2.27 ลักษณะของตัวสร้างความปั่นป่วนที่ใช้เพื่อขวางการไหล

### 2.5.2 การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ( $A$ ) เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $\dot{Q}$ ) ให้สูงขึ้นได้ โดยเฉพาะในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน อาทิ การให้ความร้อน การระบายความร้อนและการทำให้แห้งบนพื้นผิวหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้โดยการติดพิน (Fins) ซึ่งจะเหมาะกับงานที่ไม่คำนึงถึงขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์มากนัก แต่อย่างไรก็ตามผลเสียที่ตามมาคือ การสิ้นเปลืองวัสดุ ขนาดของอุปกรณ์ที่ใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้นและหากเป็นการไหลในท่อหรือช่องการไหลแบบปิดก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบ เนื่องด้วยพินจะกลายเป็นตัว

ด้านทานการไหลทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มในระบบให้สูงขึ้น ลักษณะการติดฟินเพื่อเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.28

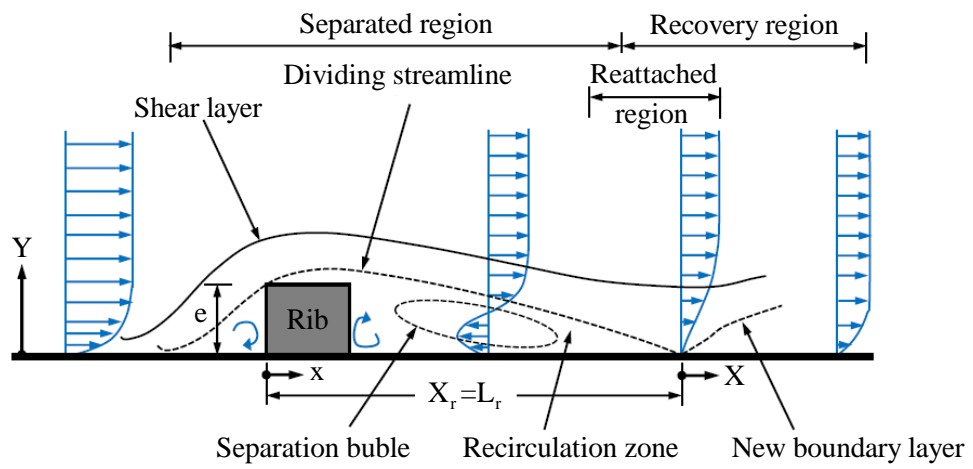


รูปที่ 2.28 การติดฟินบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

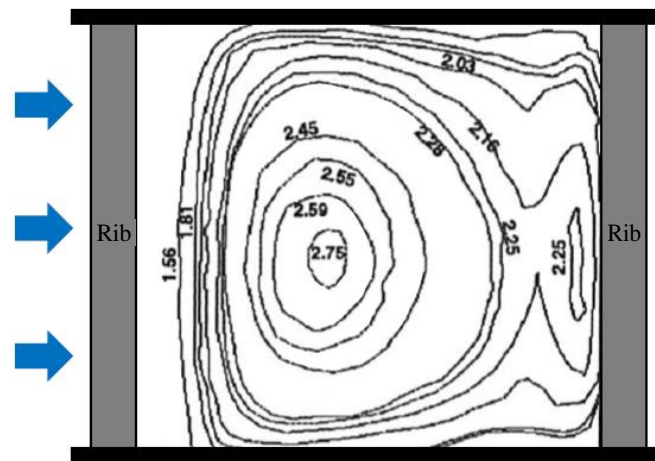
### 2.5.3 การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

ครีบริ่งสร้างความปั่นป่วน (Rib turbulator) คือ ส่วนที่ติดตั้งบนพื้นผิวเพื่อวางขวางการไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะวางขวางการไหลตามแนวราบทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านหลังการติดตั้งครีบริ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนากระบวนการระบายความร้อนขึ้นโดยใช้ครีบริ่ง การไหลของของไหลผ่านครีบริ่งจะทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบริ่ง (Downstream) เกิดการไหลหมุนวนเกาะติดกับผนังมากขึ้นส่งผลต่อการพัฒนาของชั้นขอบเขตค่อนข้างมาก โดยการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบริ่งขึ้นอยู่กับความสูงของครีบริ่ง (Rib height,  $e$ ) ระยะห่างระหว่างครีบริ่ง (Pitch,  $p$ ) มุมการติดตั้งครีบริ่ง (Rib angle,  $\theta$ ) รูปแบบหน้าตัดของครีบริ่ง (Rib profile) และช่องการไหลที่ติดครีบริ่ง (Rib channel) ตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวต่างกัน นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงยังขึ้นอยู่กับระยะการไหลหมุนวนเกาะติดกับผนัง (Reattachment length,  $L_r$ ) รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างการไหลผ่านครีบริ่งสร้างความปั่นป่วน จะเห็นว่าบริเวณด้านหลังของการติดครีบริ่งการไหลของของไหลจะเกิดการปั่นป่วนเรียกบริเวณนั้นว่า “Recirculation zone” โดยบริเวณนี้จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเมื่อเทียบกับบริเวณใกล้เคียง

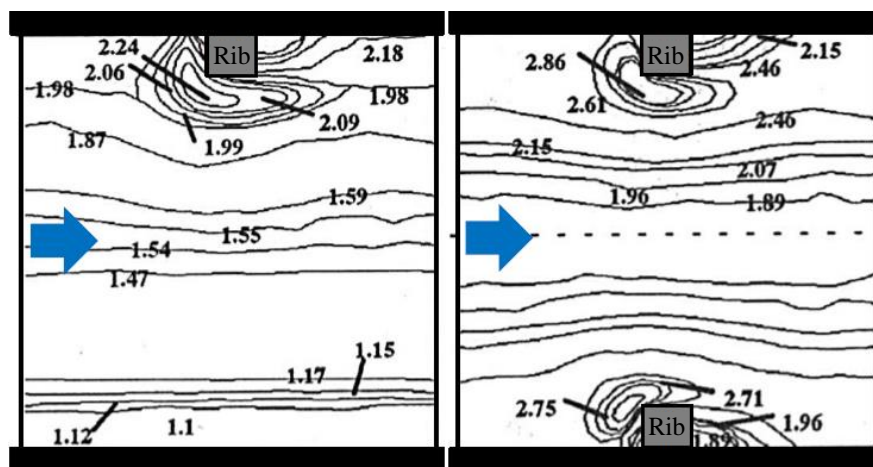
รูปที่ 2.30 แสดงสัมประสิทธิ์การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีการติดครีบริ่งขวางการไหลที่อัตราส่วนระยะพิทต่อความสูงครีบริ่ง ( $p/e$ ) เท่ากับ 12 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณการไหลเกาะติดผนัง (Flow reattachment) และผลของผนังด้านข้างต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.31 พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการติดตั้งครีบริ่งทั้งบนและล่างของช่องการไหลสูงกว่าการติดตั้งครีบริ่งด้านเดียวโดยกำหนดที่อัตราการไหลเท่ากัน



รูปที่ 2.29 โครงสร้างการไหลผ่านครีบสร้างความเป็นปั่นป่วน [10]



รูปที่ 2.30 สัมประสิทธิ์การเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [10]



รูปที่ 2.31 ผลของผนังด้านข้างต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [10]

#### 2.5.4 การระบายความร้อนแบบธรรมชาติและการระบายความร้อนแบบบังคับ

การระบายความร้อนให้กับอาคาร ระบบหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานของระบบได้ 2 รูปแบบ คือ การระบายความร้อนแบบธรรมชาติ (Passive cooling) และการระบายความร้อนแบบบังคับ (Active cooling)

การระบายความร้อนแบบธรรมชาติ (Passive cooling) เป็นการระบายความร้อนที่ไม่ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบ กล่าวคือ เป็นการอาศัยหลักการจากธรรมชาติในการระบายความร้อน เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศ เมื่ออากาศนั้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ความหนาแน่นของอากาศก็จะลดลง อากาศที่ร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนทำให้อากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าเคลื่อนเข้ามาแทนที่เกิดเป็นการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งได้มีการนำหลักการนี้มาใช้ในการออกแบบการระบายความร้อนมากมายดังตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน คือ การระบายความร้อนให้กับอาคารที่มีการติดตั้งหน้าต่างหรือการพิจารณาทิศทางของบ้าน ปัจจุบันได้มีการนำหลักการระบายความร้อนแบบธรรมชาติที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางมาระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การติดตั้งครีบระบายความร้อนที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การไหลเวียนอากาศตามธรรมชาติหรือแม้กระทั่งการระบายความร้อนโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการสร้างการไหลของน้ำและติดตั้งชุดระบายความร้อนบริเวณด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

การระบายความร้อนแบบบังคับ (Active cooling) เป็นการระบายความร้อนที่อาศัยพลังงานในการขับเคลื่อนระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้พลังงานไฟฟ้าอาทิเช่น การใช้พัดลมสร้างการไหลเวียนของอากาศ การใช้ปั๊มน้ำสร้างการไหลเวียนของน้ำ ซึ่งข้อดีของการระบายความร้อนแบบบังคับ คือ สามารถควบคุมอัตราการไหลในการระบายความร้อนได้และมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ ตัวอย่างการระบายความร้อนแบบบังคับที่ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การติดตั้งพัดลมระบายอากาศในช่องบังคับการไหลบริเวณด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้ปั๊มน้ำในการสร้างการไหลเวียนของน้ำในการระบายความร้อนทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

การเลือกใช้การระบายความร้อนแบบใดนั้น จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบระบบที่จะต้องพิจารณาทั้งระดับอุณหภูมิที่จะทำการระบายความร้อน ความสม่ำเสมอในการระบายความร้อน พื้นที่การติดตั้งระบบจนกระทั่งจุดคุ้มทุนในการติดตั้งและความต้องการด้านพลังงานของระบบ เป็นต้น

## 2.6 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.6.1 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสมรรถนะและการลดอุณหภูมิของแผง PV

Krauter และคณะ [11] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผง PV ชนิด โพลี-คริสตัลไลน์ซิลิกอนด้วยการสร้างฟิล์มน้ำไหลผ่านผิวหน้า (ผิวรับแสง) เพื่อลดการสะท้อนและอุณหภูมิของแผง PV โดยในการทดสอบได้ติดตั้งหัวฉีด (Nozzle) จำนวน 12 หัว บริเวณส่วนบนของแผงเพื่อทำหน้าที่ในการสร้างฟิล์มน้ำที่ความหนา 1 mm และควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 12 LPM (0.2 kg/s) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จากการศึกษาพบว่า การปล่อยฟิล์มน้ำไหลผ่านพื้นผิวรับแสงนั้นสามารถลดการสะท้อนลงได้ 2.0-3.6% ลดอุณหภูมิของแผงลงได้สูงสุด 22 °C เมื่อเทียบกับแผงทั่วไปที่ใช้อ้างอิงทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสุทธิอยู่ที่ 8.0-9.0%



รูปที่ 2.32 การสร้างฟิล์มน้ำไหลผ่านพื้นผิวรับแสงโดยใช้หัวฉีดจำนวน 12 หัว [11]

Abdolzadeh และคณะ [12] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผง PV ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำให้บริเวณผิวรับแสงซึ่งเป็นการลดการสะท้อนของแสงและลดอุณหภูมิให้กับแผง โดยได้ติดตั้งหัวฉีด (Spray nozzle) บริเวณด้านบนของแผง PV ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 90 W และพ่นละอองน้ำด้วยอัตราการไหลที่ 50 LPH (0.014 kg/s) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 จากการศึกษาพบว่า การพ่นละอองน้ำบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV นั้นสามารถช่วยลดอุณหภูมิของแผงลงได้สูงสุดที่ 23 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1.35% เมื่อเทียบกับแผงชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ติดตั้งระบบระบายความร้อน

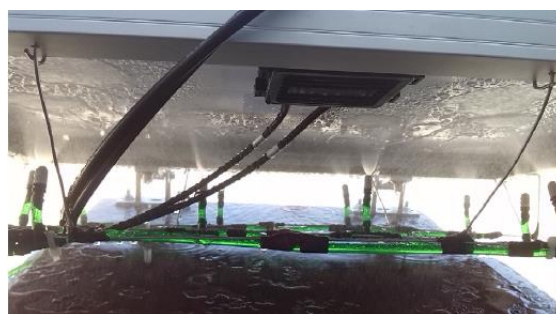


รูปที่ 2.33 การระบายความร้อนให้แผงPVด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำที่ผิวรับแสง [12]

Nizetic และคณะ [13] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผง PV โดยวิธีการพ่นละอองน้ำ บริเวณด้านหน้า (ผิวรับแสง) และด้านหลังให้กับแผงเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิ หัวฉีดพ่นละอองน้ำ (Nozzle) จำนวนทั้งสิ้น 20 ตัวถูกติดตั้งทั้งด้านหน้าและหลังแผงชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 130 W ดังแสดงในรูปที่ 2.34 เพื่อพ่นละอองน้ำระหว่างการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่า การฉีดพ่นละอองน้ำบริเวณด้านหน้าและหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราการไหลน้ำ 225 LPH (0.045kg/s) สามารถลดอุณหภูมิให้กับแผง PV ได้สูงสุด 30 °C ส่งผลให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 7.7% เมื่อเทียบกับแผงทั่วไปที่ใช้อ้างอิง



(ก) ด้านหน้าแผงPV



(ข) ด้านหลังแผงPV

รูปที่ 2.34 การพ่นละอองน้ำเพื่อระบายความร้อนที่ด้านหน้าและหลังแผง PV [13]



นิคม [14] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผง PV โดยติดตั้งระบบหล่อเย็นสองรูปแบบ บริเวณด้านหลังแผง PV ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน โดยแผงหนึ่งติดตั้งระบบหล่อเย็นแบบแผ่นครีบบน ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน อีกแผงหนึ่งติดตั้งระบบหล่อเย็นแบบท่อทองแดง และใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน นอกจากนี้ยังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเดียวกัน อีกหนึ่งแผงไว้เป็นแผงอ้างอิงการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อทองแดงแบบขนานและใช้น้ำเป็นตัวกลางระบายความร้อนที่อัตราการไหล  $4.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  หรือ  $0.0042 \text{ kg/s}$  ทำให้อุณหภูมิของแผงลดลง  $21.05 \text{ }^\circ\text{C}$  ส่งผลให้แผงมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น  $0.51\%$  สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบหล่อเย็นแบบแผ่นครีบบนและใช้อากาศเป็นตัวกลางระบายความร้อนนั้น สามารถลดอุณหภูมิของแผงได้  $9.10 \text{ }^\circ\text{C}$  และส่งผลให้ประสิทธิภาพแผงเพิ่มขึ้น  $0.28\%$  รูปที่ 2.35 เป็นการติดตั้งระบบหล่อเย็นแบบแผ่นครีบบนและแบบท่อทองแดงขนานที่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์



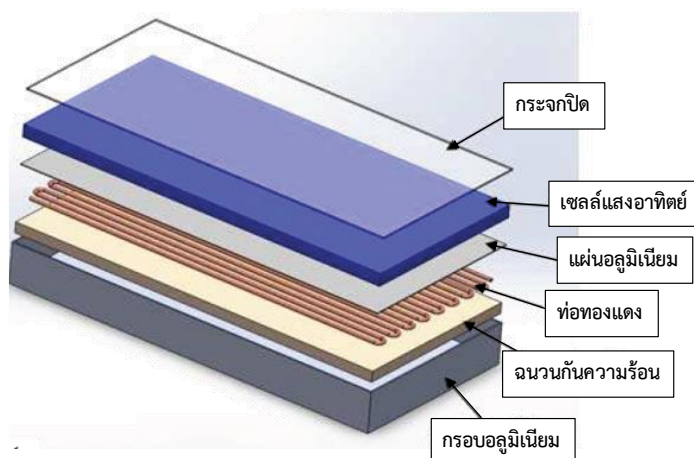
(ก) ระบบหล่อเย็นแบบท่อทองแดง



(ข) ระบบหล่อเย็นแบบครีบบน

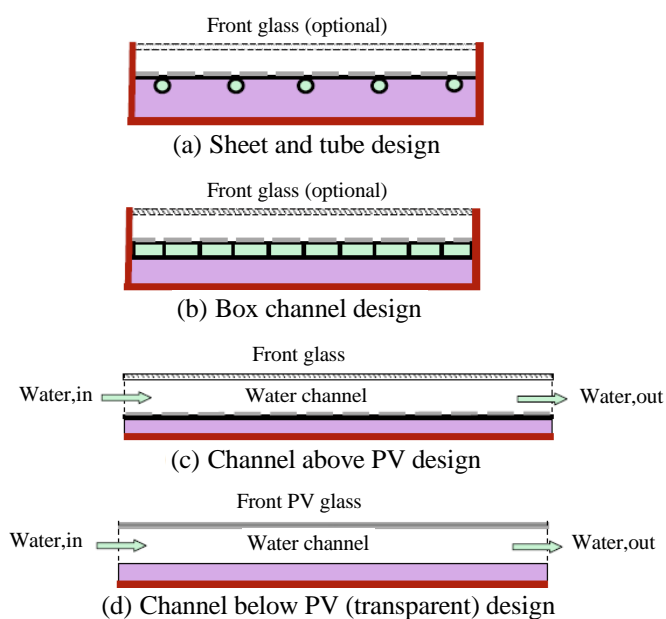
### รูปที่ 2.35 รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ใช้ในการทดสอบแผง PV [14]

มณฑนา และคณะ [15] ได้ประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน โดยใช้แผง PV สองชนิดที่มีการติดตั้งระบบดูดซับความร้อนไว้ โดยชนิด A เป็นแผง PV แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนและชนิด B เป็นแผงแบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งทั้งสองชนิดนั้นได้ติดตั้งท่อทองแดงเพื่อให้น้ำไหลผ่านไว้ด้านหลังแผงเพื่อดูดซับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.36 การทดลองกระทำที่อัตราการไหลของน้ำสองค่าคือ  $0.03$  และ  $0.06 \text{ kg/s}$  พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพทางความร้อนและไฟฟ้าของแผงชนิด A มีค่า  $53.22\%$  และ  $10.02\%$  ตามลำดับและสำหรับชนิด B มีค่า  $42.70\%$  และ  $4.57\%$  ตามลำดับ



รูปที่ 2.36 ส่วนประกอบของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ [15]

Chow [16] ได้ศึกษาสมรรถนะของแผง PV/T ที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน และนำน้ำร้อนที่ผลิตได้ไปใช้งาน ซึ่งรูปแบบของตัวเก็บความร้อนที่ใช้ในแผง PV/T มีด้วยกัน 4 รูปแบบ คือ แบบท่อและแผ่นความร้อน (Sheet and tube) แบบกล่อง (Box channel) แบบช่อง การไหลติดตั้งด้านบน (Channel above PV) และช่องบังคับการไหลติดตั้งด้านล่างแผง PV (Channel below PV) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 จากผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งตัวเก็บความร้อนแบบ ท่อและแผ่นความร้อนและตัวเก็บความร้อนแบบกล่องนั้นเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานแต่ยังมี ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับตัวเก็บความร้อนที่มีลักษณะเป็นช่องการไหล ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพทาง ความร้อนที่สูงกว่าแต่มีข้อเสียคือน้ำหนักมากทำให้ไม่เหมาะกับการติดตั้งบนหลังคา



รูปที่ 2.37 ภาพหน้าตัดของตัวเก็บความร้อนที่ใช้กับแผงPV/T [16]

Bahaidarah และคณะ [17] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV ที่ติดตั้งช่องการไหลของน้ำบริเวณด้านหลังแผง ในการทดสอบใช้แผง PV ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 230 W เพื่อติดตั้งตัวเก็บความร้อนแบบกล่องให้น้ำไหลผ่านโดยใช้อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 3.6 LPM น้ำที่ไหลผ่านกล่องจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อนโดยมีปั๊มสร้างการไหลเวียนของน้ำ จากผลการทดสอบพบว่าแผง PV ที่ติดตั้งกล่องน้ำระบายความร้อนสามารถลดอุณหภูมิของแผงลงได้ 20% และส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 9%

Salem และคณะ [18] ได้คิดค้นการเพิ่มสมรรถนะให้กับแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยใช้การติดตั้งช่องการไหลแบบขนาน (Straight channel) และช่องการไหลแบบก้นหอย (Helical channel) ซึ่งมีน้ำเป็นตัวกลางระบายความร้อน ตัวเก็บความร้อนนี้ทำจากแผ่นอลูมิเนียมที่กัดร่องให้มีหน้าตัดช่องการไหลที่ 10 mm x 10 mm ในลักษณะช่องขนานและก้นหอย ตัวเก็บความร้อนทั้งสองแบบถูกนำไปติดตั้งที่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับแผงที่ไม่มีการระบายความร้อน จากผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งช่องการไหลแบบขนานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้ประมาณ 11.1-12.9% และมีประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ที่ 31.6-47.2% สำหรับการติดตั้งช่องการไหลแบบก้นหอยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้ที่ 11.5-13.5% โดยทั้งสองรูปแบบใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 0.25-1 LPM (0.004-0.017 kg/s) รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะช่องการไหลทั้งสองแบบ



(ก) ช่องการไหลแบบขนาน

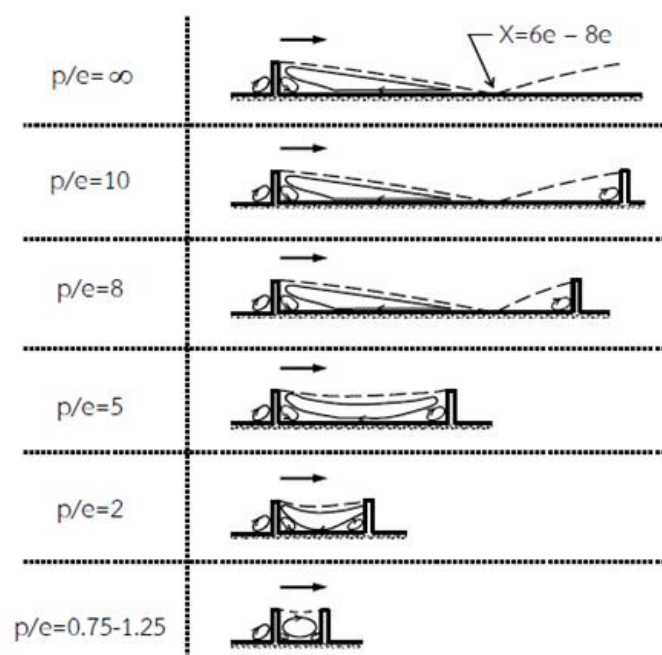


(ข) ช่องการไหลแบบก้นหอย

รูปที่ 2.38 ลักษณะของช่องการไหลทั้งสองแบบที่ใช้เป็นตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T [18]

## 2.6.2 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับครีบบรรบายความร้อนและช่องการไหล

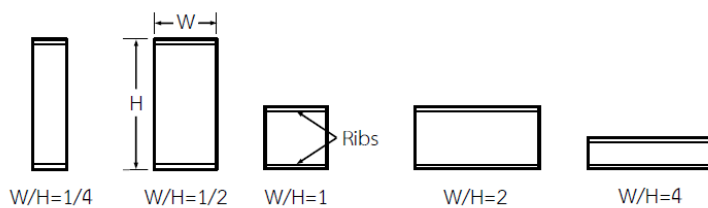
Webb และคณะ [19] ได้ทำนายผลของรูปแบบการไหลตามแนวกระแสน้ำของครีบที่ระยะพิทต่อความสูงครีบ ( $p/e$ ) ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.39 ผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่มีระยะพิทต่อความสูงครีบต่ำๆ ( $p/e < 5$ ) เกิดการไหลแยกตัวด้านหลังของครีบตัวแรกและหมุนวนขึ้นระหว่างครีบทั้งสอง นอกจากนี้ ยังพบว่าระยะพิทต่อความสูงครีบต่ำๆ จะไม่เกิดระยะการไหลเกาะติดกับผนัง (Reattachment length) แต่ในทางตรงกันข้ามที่ระยะพิทต่อความสูงครีบเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลจะเกิดการไหลแยกตัวหมุนวนด้านหลังครีบตัวแรกและเกิดระยะการไหลเกาะติดบริเวณผนัง และชั้นขอบเขตของผนังเริ่มสร้างหนาขึ้นก่อนไหลปะทะกับครีบตัวที่สองส่งผลต่อการพาความร้อนที่เพิ่มขึ้นยกเว้นที่กรณีระยะพิทต่อความสูงครีบมาก ( $p/e = \infty$ ) การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเนื่องจากความต่อเนื่องของการไหลน้อยลง โดยความยาวของบริเวณแยกตัวด้านหลังครีบไม่ได้เปลี่ยนเมื่อระยะพิทเพิ่มขึ้น จากหลายๆ การวิจัยพบว่า ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ระยะพิทต่อความสูงครีบประมาณ 10 สำหรับช่องทางตัดสี่เหลี่ยมด้วยการติดตั้งครีบทั้งผนังบนและล่าง



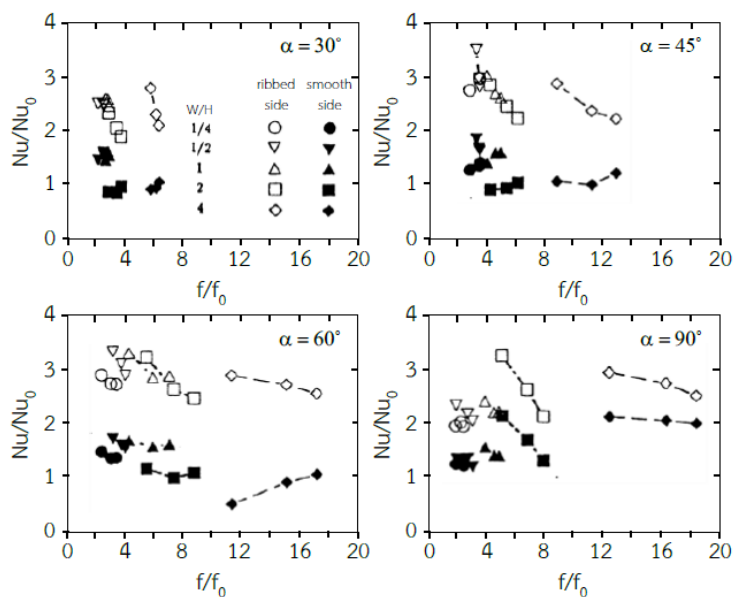
รูปที่ 2.39 รูปแบบการไหลตามแนวกระแสน้ำการไหลของครีบที่ระยะ  $p/e$  ต่างๆ [19]

Park และคณะ [20] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่อง การไหล (W/H) ต่อสัมประสิทธิ์การกระจายการถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 ในทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล W/H=1/4, 1/2, 1, 2 และ 4 มุมการติดตั้งครีป 30°, 45°, 60° และ 90° ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re=30,000$  จากผลการทดลองพบว่า การติดตั้งครีปที่มุม 60° ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่มีนัยสำคัญมาก แต่ความดันลดนั้นเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก (1/4 ถึง 4) ซึ่งคล้ายกับผลของการติดตั้งครีปที่มุม 45° และ 90° โดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลน้อย ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลที่มาก ยกเว้นอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลน้อยของการติดตั้งครีปทำมุม 30° ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับการติดตั้งครีปทำมุมอื่นๆ นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลมาก (W/H=4) ของการติดตั้งครีปทำมุม 30° มีผลของความเสียหายและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับการติดตั้งครีปทำมุมอื่นๆ

รูปที่ 2.41 แสดงการเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์การกระจายการถ่ายเทความร้อนระหว่างอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล (W/H=1/4 ถึง 4) ต่อมุมของการติดตั้งครีป พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการติดตั้งครีบบนผนังเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า และความดันลดเพิ่มขึ้นประมาณ 4 ถึง 8 เท่าของการติดตั้งครีปทำมุม 45° และ 60° เมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีการติดตั้งครีป และยังพบว่าความดันลดเพิ่มขึ้นเพียง 2 ถึง 4 เท่าของการติดตั้งครีปทำมุม 45° และ 60° ในระดับที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากันของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลแคบ (W/H=1/4) อย่างไรก็ตาม ในระดับที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากันของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลกว้าง (W/H=4) ความดันลดเพิ่มสูงขึ้น 8 ถึง 16 เท่าของความเสียหายในช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีป นอกจากนี้ ยังสรุปได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลแคบมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลกว้าง

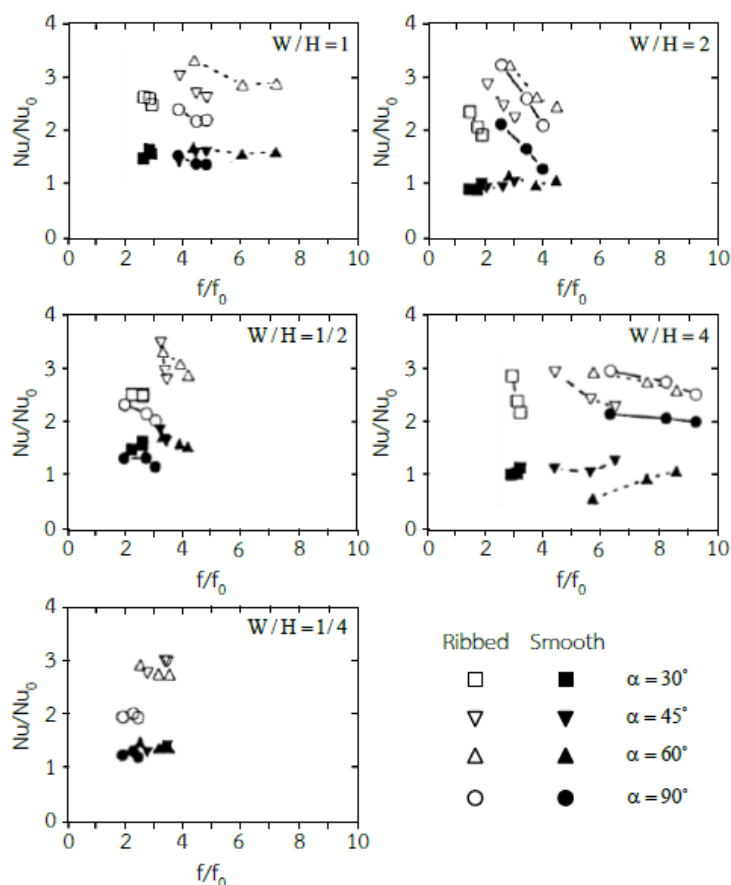


(ก) หน้าตัดของช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมที่อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงต่างๆ



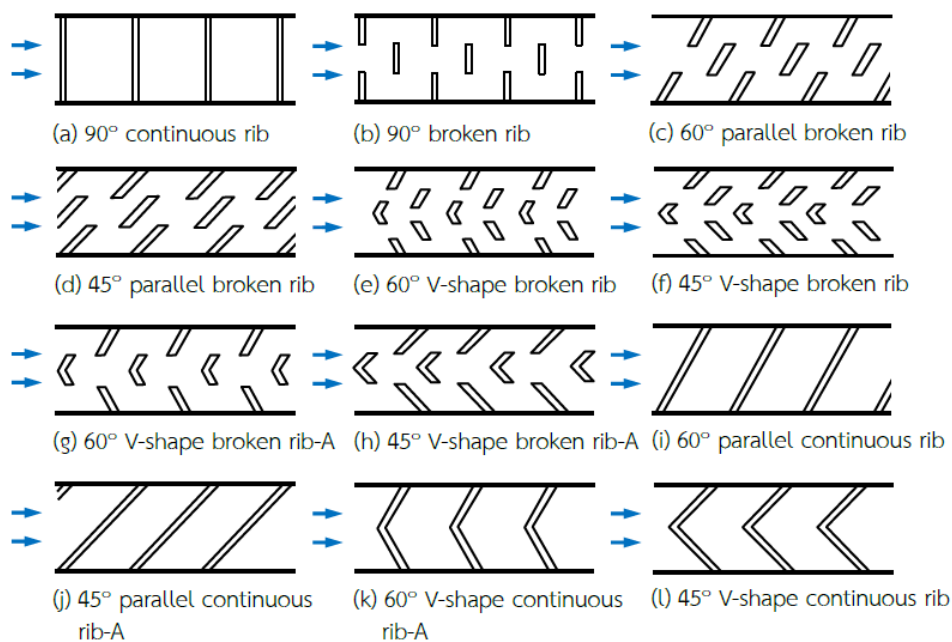
(ข) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการติดครีบบวมต่างๆ

รูปที่ 2.40 อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างต่อการถ่ายเทความร้อน [20]

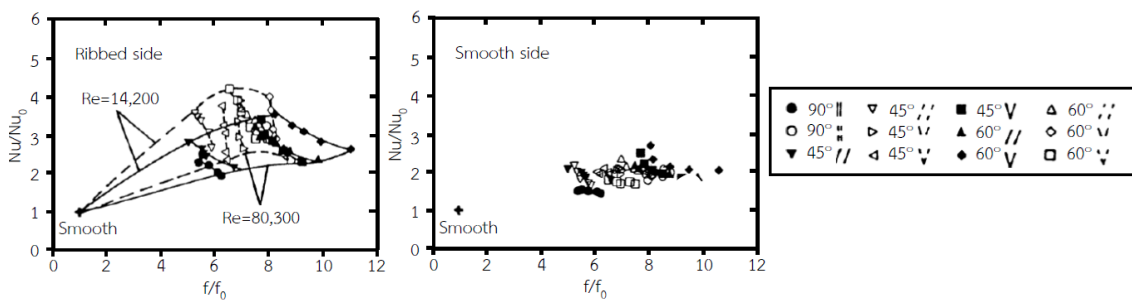


รูปที่ 2.41 ผลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อน [20]

Han และ Zang [21] ได้ศึกษารูปแบบการติดตั้งครีบบนพื้นผิว ซึ่งรูปแบบการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งรูปแบบการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ครีบบางวางตั้งฉากกับการไหล ครีบบางเอียงทำมุมกับการไหลและครีบบนพื้นผิว โดยแต่ละรูปแบบของครีบบนพื้นผิวจะถูกแบ่งเป็นครีบบนพื้นผิวต่อเนื่อง (Continuous rib) และครีบบนพื้นผิวแตก (Broken rib) อีกด้วย รูปแบบการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่แสดงในรูปที่ 2.42 ในการทดสอบอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลผ่านพื้นผิวร้อนที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิว โดยทดสอบที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ 15,000 และ 80,000 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ลดลง แต่อัตราส่วนความเสียดทานกลับเพิ่มขึ้นซึ่งจะเกิดกับทุกรูปแบบการติดตั้งครีบบนพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่าครีบบนพื้นผิวแตกยังให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ที่สูงกว่าครีบบนพื้นผิวต่อเนื่องในกรณีเปรียบเทียบที่รูปแบบครีบบนพื้นผิวเดียวกัน



รูปที่ 2.42 รูปแบบการติดตั้งครีบริบที่ใช้ทดสอบการถ่ายเทความร้อน [21]

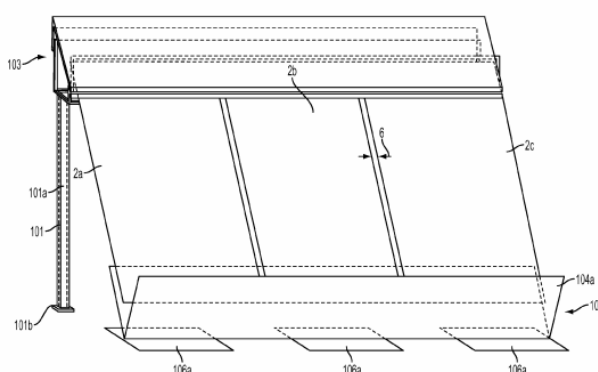


รูปที่ 2.43 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของรูปแบบการติดตั้งครีบริบ [21]

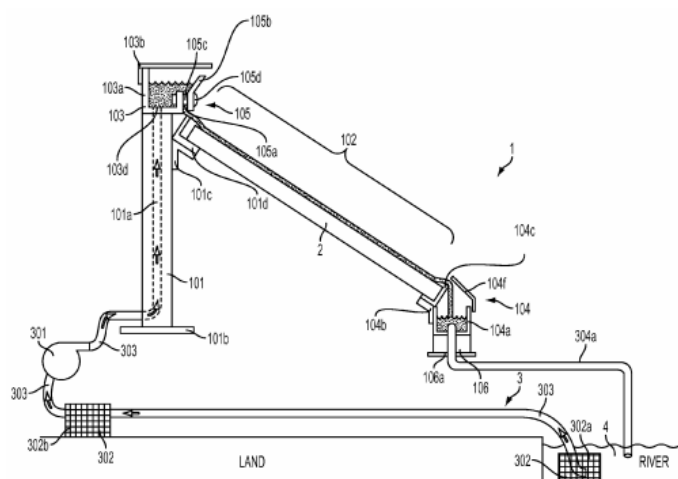


### 2.6.3 ทบทวนสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

US 20140060620A1 [22] ได้เปิดเผยแผง PV ที่ระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำด้านหน้าผิวรับแสง ซึ่งระบบนี้ประกอบไปด้วย แผง PV โครงสร้างจับยึดแผงและระบบน้ำระบายความร้อน โดยโครงสร้างจับยึดแผงนี้จะมีรางน้ำและท่อน้ำประกอบติดอยู่ รางน้ำระบายความร้อนถูกติดตั้งไว้ส่วนบนของโครงสร้างจับยึดเหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อปั๊มดูดน้ำจากแหล่งกักเก็บมายังรางน้ำระบายความร้อน น้ำจะล้นลงมายังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะของฟิล์มน้ำ ฟิล์มน้ำจะไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อระบายความร้อนให้กับผิวรับแสงและไหลลงไปยังรางกักเก็บน้ำซึ่งถูกติดตั้งไว้ด้านล่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไหลไปยังแหล่งกักเก็บน้ำต่อไป แผง PV ที่ติดตั้งรางน้ำระบายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.44 และการระบายความร้อนด้วยวิธีการสร้างฟิล์มน้ำไหลผ่านผิวรับแสงดังแสดงในรูปที่ 2.45

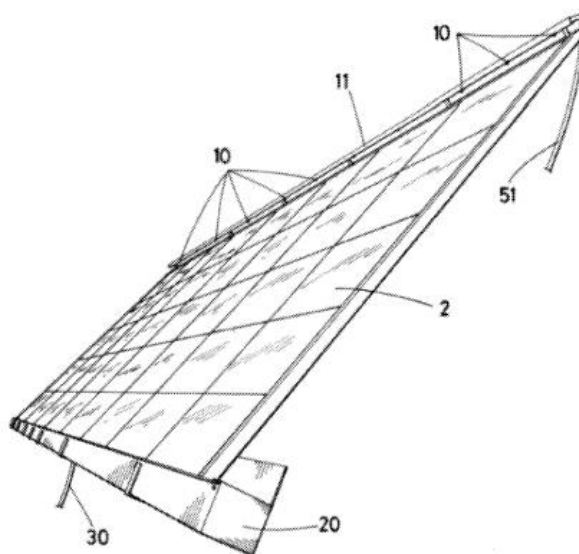


รูปที่ 2.44 แผง PV ที่ติดตั้งรางน้ำเพื่อสร้างฟิล์มน้ำระบายความร้อน [22]



รูปที่ 2.45 การระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำไหลผ่านพื้นผิวรับแสงของแผง PV [22]

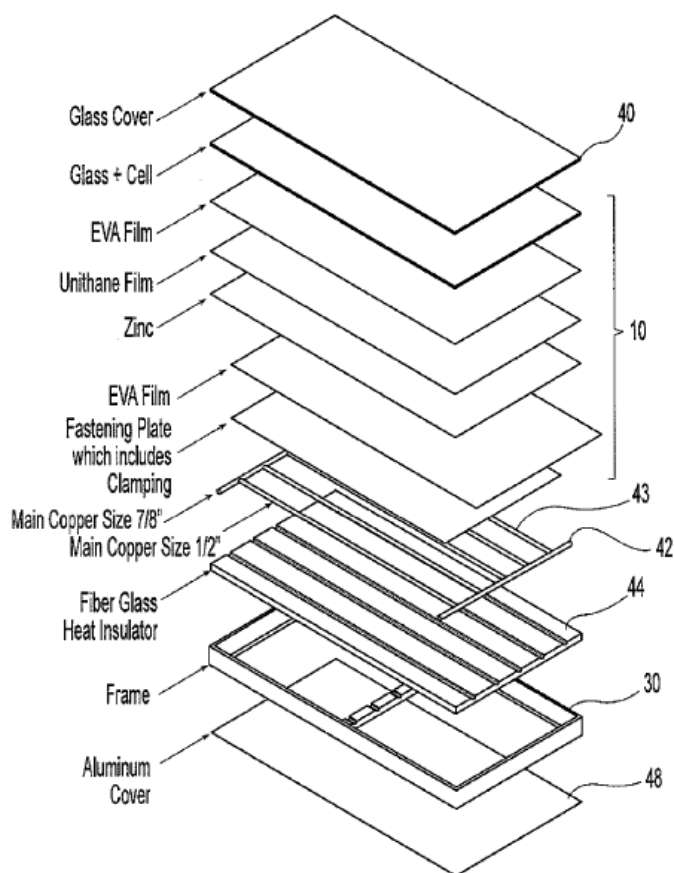
US 20150357969A1 [23] ได้เปิดเผยการลดอุณหภูมิบริเวณผิวรับแสงของแผง PV โดยการพ่นละอองน้ำเพื่อระบายความร้อนและทำความสะอาดผิวรับแสง ซึ่งภายในระบบประกอบไปด้วยแผง PV หัวฉีดพ่นละอองน้ำและระบบท่อน้ำระบายความร้อน โดยหัวฉีดพ่นละอองน้ำนี้จะถูกติดตั้งที่ด้านบนแผงด้วยตัวจับยึดและจะปล่อยละอองน้ำเพื่อลดอุณหภูมิให้กับผิวรับแสงเมื่ออุณหภูมิของแผงเกิน 40 °C รูปที่ 2.46 แสดงแผง PV ที่ติดตั้งหัวฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวรับแสง โดยหัวฉีดพ่นละอองน้ำนั้นถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ 10



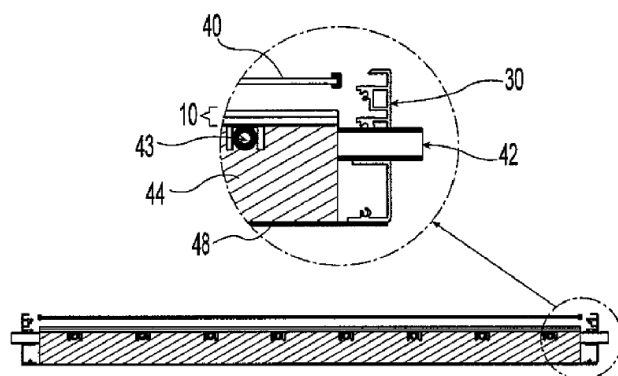
รูปที่ 2.46 แผง PV ที่ติดตั้งหัวฉีดพ่นละอองน้ำระบายความร้อนและทำความสะอาดผิวรับแสง [23]

US 20080011289A1 [24] ได้เปิดเผยแผง PV/T ที่ติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อนไว้ด้านหลังและมีตัวจับยึดแบบพิเศษ ซึ่งลักษณะของแผงเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าในกล่องถูกแบ่งเป็นชั้นๆ เริ่มจากส่วนบนสุดที่ใช้ในการรับแสงอาทิตย์เป็นกระจกใส ถูกติดตั้งไว้เพื่อปกป้องเซลล์แสงอาทิตย์จากการกระแทกหรือสิ่งสกปรก ถัดมาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งจะติดอยู่บนแผ่นฐานรองที่ทำมาจากกระจกโดยใช้กาวประสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับฐานรองนี้ ต่อมาเป็นแผ่นจับยึดท่อระบายความร้อนที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมและมีตัวจับยึดท่อลักษณะครึ่งวงกลมติดอยู่บนแผ่นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นจับยึดกับท่อน้ำระบายความร้อน ถัดมาเป็นชุดท่อน้ำระบายความร้อนซึ่งทำจากท่อทองแดงขนาด 1/2 in วางขนานกันจำนวน 5 ท่อและปลายท่อหัวท้ายทั้ง 5 นั้นถูกเชื่อมติดกับท่อทองแดงขนาด 7/8 in เพื่อใช้เป็นท่อน้ำหลัก ถัดมาเป็นฉนวนกันความร้อนซึ่งทำจากไฟเบอร์กลาสเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนของระบบและสุดท้ายเป็นกรอบและฝาปิดอลูมิเนียมที่ใช้เพื่อยึดทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน รูปที่ 2.47 แสดงโครงสร้างของแผง PV/T แบบแยกส่วน โดยหมายเลขที่ 30 เป็นกรอบอลูมิเนียมที่ติดตั้งตัวจับยึดท่อแบบพิเศษ

หมายเลขที่ 44 เป็นฉนวนกันการสูญเสียความร้อนและหมายเลขที่ 42-43 เป็นชุดท่อทองแดงที่ใช้ในการดูดซับความร้อนและระบายความร้อนด้วยน้ำ รูปที่ 2.48 แสดงรายละเอียดตัวจับยึดท่อของแผง PV/T



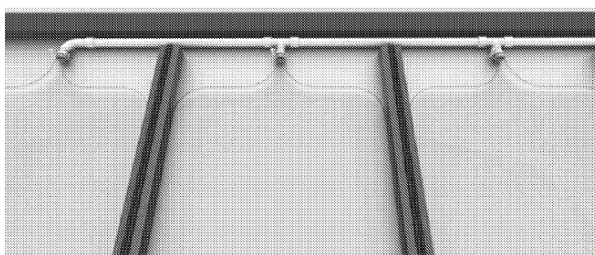
รูปที่ 2.47 โมเดลแผง PVT แบบแยกส่วน [24]



รูปที่ 2.48 ภาพหน้าตัดการประกอบตัวจับยึดแผง PV/T [24]

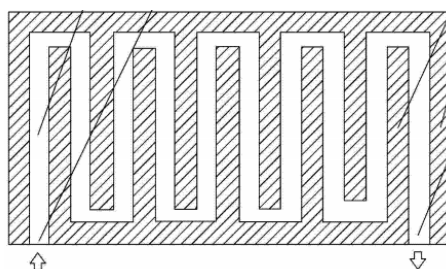
DK 1774688B1 [25] ได้เปิดเผยแผงดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน ซึ่งแผงนี้  
ได้ใช้ติดตั้งแทนหลังคาของอาคารตัวอย่างในการทดสอบโดยแผงดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์แบบ

ผสมผสานนี้สามารถผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าและน้ำร้อน แผงรับแสงอาทิตย์แบบผสมผสานประกอบด้วย ชั้นที่หนึ่งเป็นแผ่นโพร่งแสงติดตั้งเพื่อป้องกันความเสียหายให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นชั้นที่รองลงมา แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับบ้านตัวอย่างที่ติดตั้ง ชั้นที่สาม รางน้ำอลูมิเนียมถูกติดตั้งด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อระบายความร้อนโดยภายในรางน้ำนี้จะมีหัวฉีดที่ใช้ในการปล่อยน้ำระบายความร้อนอยู่รางละหนึ่งหัวดังแสดงในรูปที่ 2.49 ชั้นที่สี่เป็นชั้นของฉนวนระบายความร้อนติดตั้งเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากระบบโดยทั้งสี่ชั้นนี้จะมีโครงสร้างหลังคาใช้เพื่อจับยึดแผงดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.49 รางน้ำระบายความร้อนที่ติดตั้งหัวฉีด [25]

CN 102208475A [26] ได้เปิดเผยแผง PV ที่ติดตั้งช่องการไหลน้ำแบบวกกลับไว้ด้านหลังของแผงเพื่อระบายความร้อนให้กับแผงและทำน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ ซึ่งแผงนี้ประกอบไปด้วย แผ่นกระจกใสกันกระแทกเป็นส่วนบนสุดของแผงถูกติดตั้งเพื่อป้องกันความเสียหายให้กับแผง PV ถัดมาเป็นแผง PV ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ ถัดมาเป็นช่องการไหลน้ำแบบวกกลับ มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมภายในถูกกันเป็นช่องบังคับการไหลที่คดเคี้ยวดังแสดงในรูปที่ 2.50 ถูกติดตั้งไว้ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อระบายความร้อนออกจากแผงโดยใช้น้ำเป็นของไหลและนำน้ำร้อนที่ได้นั้นไปใช้ประโยชน์ สุดท้ายเป็นฉนวนกันความร้อนติดตั้งไว้ส่วนล่างสุดของแผงโดยจะหุ้มช่องการไหลแบบวกกลับไว้ไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ด้านหลังแผง



รูปที่ 2.50 ลักษณะช่องบังคับการไหลแบบวกกลับ [26]

#### 2.6.4 สรุปการทบทวนเอกสาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวิธีเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการลดอุณหภูมิของแผงนั้นมีหลากหลายรูปแบบ อาทิ การระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำหรือการพ่นละอองน้ำบริเวณด้านหน้าผิวรับแสง การติดท่อระบายความร้อนในลักษณะท่อขนานหรือขดไปมาและการติดตั้งช่องการไหลแบบทั่วๆไปบริเวณด้านหลังแผง ซึ่งวิธีการที่กล่าวมานั้นล้วนส่งผลให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบปัญหาของการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ด้านหน้าผิวรับแสงด้วยวิธีการสร้างฟิล์มน้ำระบายความร้อน คือ สามารถใช้ระบายความร้อนเฉพาะที่อัตราการไหลต่ำเท่านั้น ส่วนวิธีการพ่นละอองน้ำนั้นมีความซับซ้อนในการติดตั้งอุปกรณ์ เช่น หัวฉีด สำหรับการระบายความร้อนที่พื้นผิวด้านหลังของแผง เช่น การติดท่อระบายความร้อนหรือช่องการไหลแบบทั่วๆไปนั้นพบว่า มีความสามารถในการพาความร้อนต่ำและใช้พลังงานในการปั๊มน้ำสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้คิดค้นแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (แผง PV/T) ที่ติดตั้งครีบนโมดูลระบายความร้อนเพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน โดยครีบจะทำให้การไหลของน้ำในโมดูลระบายความร้อนเกิดความปั่นป่วนส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนได้สูงขึ้น

#### 2.6.5 ช่องว่างงานวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม่มีการประยุกต์การติดตั้งครีบและช่องการไหลภายในโมดูลระบายความร้อนที่ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์และไม่มีการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วน

### บทที่ 3

#### ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผง PV ด้วยวิธีการลดอุณหภูมิของแผง นอกจากนั้นยังมีการนำความร้อนที่ได้จากแผงไปใช้ให้เกิดประโยชน์และเกิดการพัฒนาเป็นแผง PV/T ขึ้น แต่วิธีการระบายความร้อนให้กับแผงที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นสามารถดึงความร้อนออกจากแผงได้น้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ต้องสูญเสียเพื่อการขับปั๊ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการเพิ่มความสามารถในการดึงความร้อนออกจากแผง PV/T ด้วยการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิวภายในโมดูลระบายความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T สูงขึ้น ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงชุดทดลองและขั้นตอนในการวิจัยซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิว เป็นการทดลองเพื่อหารูปแบบครีบบนพื้นผิวและลักษณะการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปติดตั้งในโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ส่วนที่ 2 การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบบนพื้นผิว เป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิว โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) เพื่อเปรียบเทียบและอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับการทดลอง และส่วนสุดท้ายการศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิวในช่องการไหลของโมดูลระบายความร้อน เป็นการนำรูปแบบครีบบนพื้นผิวที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปติดตั้งในโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และนำแผง PV/T นี้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและนำความร้อนเทียบกับแผง PV แบบทั่วไปที่ใช้ในการอ้างอิง

#### 3.1 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิว

การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบนพื้นผิว มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบครีบบนพื้นผิวและลักษณะการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปติดตั้งในโมดูลระบายความร้อน ซึ่งในการศึกษานี้จะเป็นการทดลองที่ใช้วิธีการถ่ายภาพทางความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) วัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนพื้นผิว แล้วคำนวณเป็นการกระจายของค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์ (Nusselt number) เพื่อดูลักษณะการถ่ายเทความร้อน และได้มีการวัดค่าการสูญเสียความดัน (Pressure drop) ด้วยทรานสดิวเซอร์ความดัน (Pressure transducer) เพื่อนำมาคำนวณเป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance) เพื่อบ่งบอกรูปแบบและลักษณะการติดตั้งครีบบนพื้นผิวที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปติดตั้งในโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และมีค่าการสูญเสียความดันน้อยที่สุด สำหรับชุดทดสอบและวิธีการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะอธิบายในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ตามลำดับ

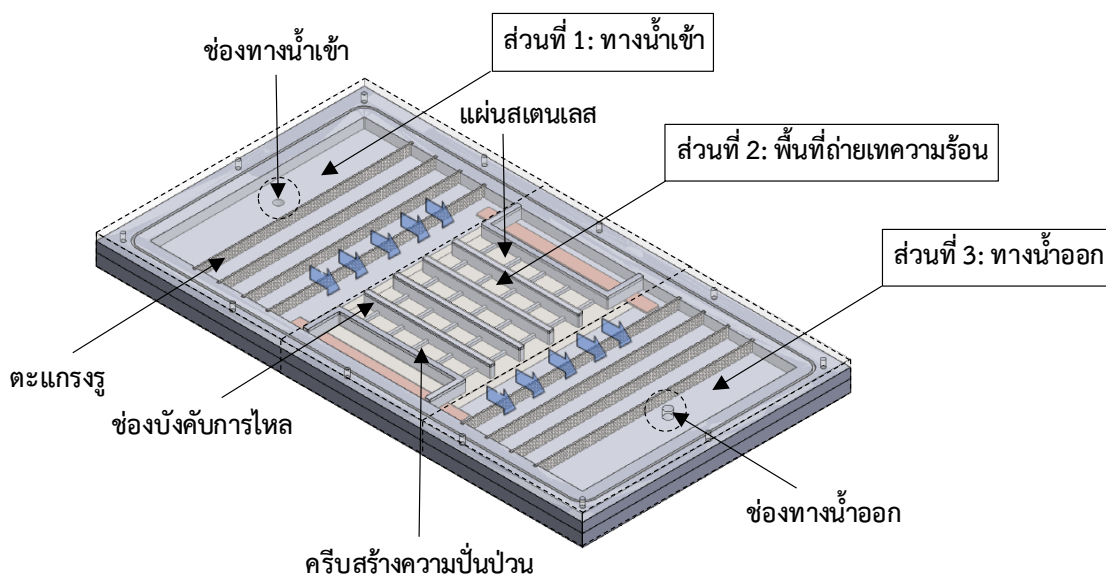
### 3.1.1 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ

ชุดทดสอบนี้ถูกใช้เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ ด้วยวิธีการถ่ายภาพทางความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนซึ่งติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วนและใช้น้ำเป็นของไหล โดยส่วนประกอบสำคัญของชุดทดสอบได้แก่ ส่วนทดสอบ ระบบสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่ ระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำและชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

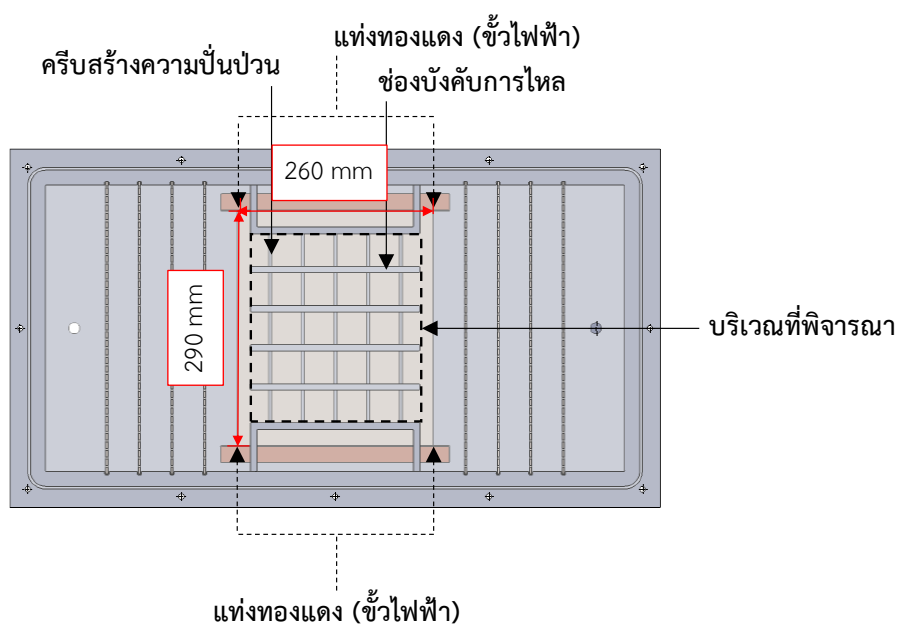
ส่วนทดสอบ (Test section) เป็นบริเวณที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยส่วนทดสอบจะทำจากแผ่นอะคริลิกหนาประกบกัน 3 ชั้น เพื่อให้ภายในมีลักษณะเป็นช่องการไหลขนาดใหญ่สามารถให้น้ำไหลผ่านได้ ที่มาของขนาดส่วนทดสอบพิจารณาจากพื้นที่บริเวณด้านหลังของแผง PV ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 W ซึ่งความความกว้างที่ 990 mm และยาว 1950 mm โดยด้านหลังของแผง PV นี้จะถูกนำมาประกบกับตัวเก็บความร้อนจำนวน 9 โมดูล ด้วยกันทำให้พื้นที่ด้านหลังแผงถูกแบ่งออกเป็น 9 ส่วน และในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนนี้ขนาดของพื้นที่ 1 ใน 9 ส่วนจะถูกนำมาพิจารณาเป็นพื้นที่ถ่ายเทความร้อนในส่วนทดสอบทำให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนมีขนาด กว้าง 290 mm ยาว 260 mm และสำหรับขนาดของส่วนทดสอบนั้นจะพิจารณาในส่วนของการพัฒนาการไหลอย่างสมบูรณ์ (Fully develop) ทำให้ได้ขนาดของส่วนทดสอบที่ ความกว้าง 440 mm ยาว 890 mm และความสูงของช่องการไหล 20 mm เมื่อพิจารณาส่วนทดสอบตามทิศทางกรไหลของน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นทางเข้าของน้ำ (Inlet) ซึ่งต่อเข้ากับท่อลำเลียงน้ำขนาด 1 นิ้ว จากระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำที่บริเวณผนังด้านล่างของช่องการไหลใหญ่และได้ติดตั้งแผ่นตะแกรงรูสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 3 mm จำนวน 4 แผ่น เพื่อทำให้เกิดความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหลก่อนเข้าสู่ส่วนพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (Heat transfer surface) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วนและช่องการไหลย่อยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนและศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ส่วนที่ 3 เป็นทางออกของน้ำ (Outlet) ซึ่งจะติดตั้งแผ่นตะแกรงรูจำนวน 4 แผ่น และต่อเข้ากับท่อลำเลียงน้ำขาออกขนาด 1 นิ้ว ที่ผนังด้านบนของช่องการไหลหลักเพื่อระบายน้ำออกไปยังถังเก็บน้ำของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำ โดยส่วนบนสุดของท่อน้ำทางออกนั้นได้ติดตั้งวาล์วสำหรับระบายอากาศที่อาจขังอยู่ในระบบอีกด้วย รายละเอียดของส่วนทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของพื้นที่ที่ใช้วัดการถ่ายเทความร้อน โดยในการทดลองนี้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนนั้นทำมาจากแผ่นสแตนเลสบาง (Stainless sheet) ซึ่งมีความหนา 0.1 mm เพื่อให้ค่าของอุณหภูมิที่วัดบนพื้นผิวด้านหลังเท่ากับพื้นผิวด้านหน้าซึ่งติดตั้งครีบในส่วนทดสอบ โดยแผ่นสแตนเลสจะถูกซิงค์จริงให้เรียบกับแผ่นอะคริลิกของส่วนทดสอบและบริเวณตรงกลางของแผ่น

อะคริลิกนั้นจะเจาะเป็นช่องหน้าต่างสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 310 mm ยาว 270 mm สำหรับถ่ายภาพทางความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด

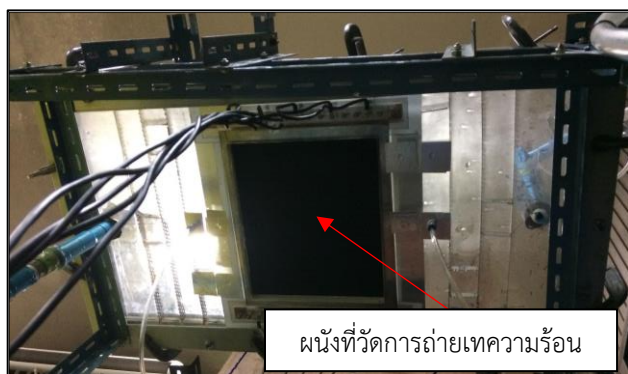


รูปที่ 3.1 รูป 3 มิติของส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีป



รูปที่ 3.2 พื้นที่ที่วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีปในโมเดล





(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน


ระบบสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux controller) ใช้สำหรับสร้างอัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีป (แผ่นสแตนเลสบาง) โดยในการทดลองนั้นจะจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) ผ่านแท่งทองแดงที่ยึดกับแผ่นสแตนเลสเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสแตนเลสและเกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว

ระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำ (Water temperature controller) ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าส่วนทดสอบที่ทางน้ำเข้า ภายในระบบประกอบไปด้วย ถังบรรจุน้ำควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กหนา 3 mm มีปริมาตรความจุที่ 36 L ภายในติดตั้งฮีตเตอร์ (Heater) กำลังไฟฟ้ารวม 4500 W และบริเวณทางออกของถังนั้นติดตั้งหัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100 ที่เชื่อมต่อไปยังชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control unit) น้ำที่อุณหภูมิคงที่ 25 °C จะผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Rotameter) และส่งไปยังส่วนทดสอบ ชุดทำความเย็น (Cool water unit) ถูกติดตั้งภายในระบบเพื่อเตรียมน้ำเย็นก่อนเข้าสู่ถังควบคุมอุณหภูมิ ชุดทำความเย็นนี้ประกอบไปด้วย ถังน้ำเย็น (Cool water tank) ขนาด 36 L ซึ่งรับน้ำมาจากทางน้ำออก (Water outlet) ของส่วนทดสอบ ภายในถังน้ำเย็นบรรจุชุดท่อทองแดงที่มีน้ำเย็นอุณหภูมิ 18 °C ไหลเวียนอยู่ภายในและภายในถังน้ำเย็นยังติดตั้งปั้มน้ำขนาดเล็ก (20 W) เพื่อสร้างการหมุนเวียนของน้ำในถังและทำให้น้ำมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและชุดทดสอบนี้ได้ใช้ปั้มน้ำขนาด 0.75 kW เพื่อสร้างการไหลเวียนของน้ำในระบบ

ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือวัด (Instrument) สำหรับการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อนจะใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera) ยี่ห้อ FLIR รุ่น T-420 ถ่ายภาพการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวด้านหลังของแผ่นสแตนเลส เนื่องด้วยแผ่นสแตนเลสนี้บางมากดังนั้นอุณหภูมิบริเวณผิวหน้าซึ่งมีการติดครีปและช่องการไหลจะเท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวด้านหลังที่ทำการวัด นอกจากนี้บนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ (ผิวด้านหลัง) ได้พ่นด้วยสีดำบางอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวเพื่อลดการสะท้อนของแสงและกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) บนพื้นผิวเท่ากับ 0.98 เพื่อความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ สำหรับการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า-ออกส่วนทดสอบ อุณหภูมิของน้ำในถัง

ควบคุม อุณหภูมิน้ำในถังน้ำเย็นและอุณหภูมิห้องทดสอบนั้นได้ใช้หัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100 เพื่อเก็บค่าและบันทึกลงในเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL-820 นอกจากนี้ยังได้วัดค่าความดันลด (Pressure drop) โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ความดัน (Pressure transducer) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น PX-154 ระบบต่างๆในชุดทดสอบนี้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีป

ระบบและอุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
1) ส่วนทดสอบ		ขนาด: 440 x 890 x 20 (mm) วัสดุ: อะคริลิก หน้าที่: เป็นช่องการไหลของน้ำที่ติดตั้งพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิวที่ติดครีป
2) พื้นที่ถ่ายเทความร้อน		ขนาด: 290 x 260 (mm) ค่า R ของแผ่นสแตนเลส: 0.016 $\Omega$ วัสดุ: พื้นผิวถ่ายเทความร้อนทำ จากแผ่นสแตนเลสบาง (0.1 mm) ถูกขึงตรึงด้วยแท่งทองแดงซึ่งเป็น ขั้วไฟฟ้า หน้าที่: เป็นบริเวณศึกษาการ ถ่ายเทความร้อน
3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรง		รุ่น WYK-15V50A-H กระแสไฟฟ้าสูงสุด: 50 A แรงดันไฟฟ้าสูงสุด: 15 V หน้าที่: จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยัง แท่งทองแดงที่ตรึงกับแผ่นสแตน เลส เพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนบน พื้นผิวที่ติดครีป

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ (ต่อ)

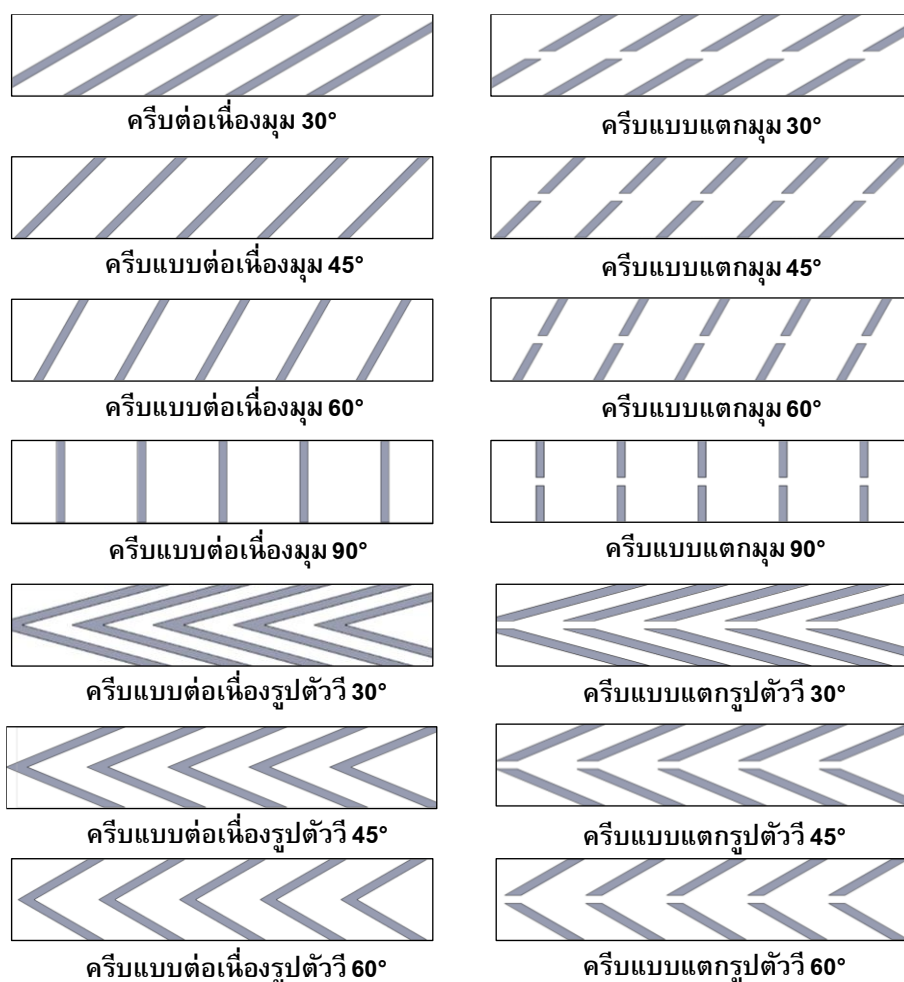
ระบบและอุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
4) แผงควบคุมอุณหภูมิ		SCR: SANGI SCR-1A045 Temp controller: Shinko BCS หน้าที่: ควบคุมอุณหภูมิน้ำให้คงที่ก่อนเข้าส่วนทดสอบ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ในถังน้ำควบคุมอุณหภูมิ
5) ถังน้ำควบคุมอุณหภูมิ		ขนาด: ปริมาตรบรรจุ 36 L วัสดุ: เหล็กหนา 3 mm หน้าที่: บรรจุน้ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิก่อนส่งไปยังส่วนทดสอบที่ทางน้ำเข้า
6) ชุดทำความเย็น		ทำน้ำเย็นอุณหภูมิ 18 °C แล้วส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนในถังน้ำเย็นผ่านทางขดท่อทองแดง เพื่อให้อุณหภูมิในถังน้ำเย็นอยู่ที่ 23 °C
7) ถังน้ำเย็น		ขนาด: ปริมาตรบรรจุ 36 L หน้าที่: รับน้ำจากทางน้ำขาออกจากส่วนทดสอบและเป็นบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำผ่านทางขดท่อทองแดงที่อยู่ภายในถัง
8) ปั๊มน้ำ		รุ่น: APP SW121T กำลัง: 0.75 kW 380V/50Hz หน้าที่: สร้างการไหลเวียนของน้ำในชุดทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ (ต่อ)

ระบบและอุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
9) กล้องอินฟราเรด (Infrared camera)		ยี่ห้อ: FLIR รุ่น: T-420 ช่วงการวัด: -20 ถึง 650 °C ความแม่นยำในการวัด: $\pm 0.05$ °C ความละเอียดภาพ: 320 x 240 (pixels) หน้าที่: ใช้ถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน
10) หัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100		รุ่น: MR2170-1/2-50 Element ช่วงการวัด: -50 ถึง 200 °C ความแม่นยำในการวัด: $\pm 0.1$ °C หน้าที่: ใช้วัดอุณหภูมิน้ำ/อากาศ
11) ทรานสดิวเซอร์ความดัน		ยี่ห้อ: OMEGA รุ่น: PX-154 ช่วงการวัด: 0 ถึง 3 inH <sub>2</sub> O ความแม่นยำในการวัด: $\pm 1\%$ หน้าที่: วัดความดันลดในระบบ
12) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล		ยี่ห้อ: Flowtech รุ่น: Z-5008 ช่วงการวัด: 1.8 ถึง 18 LPM ความแม่นยำในการวัด: $\pm 5\%$ หน้าที่: วัดอัตราการไหลของน้ำ

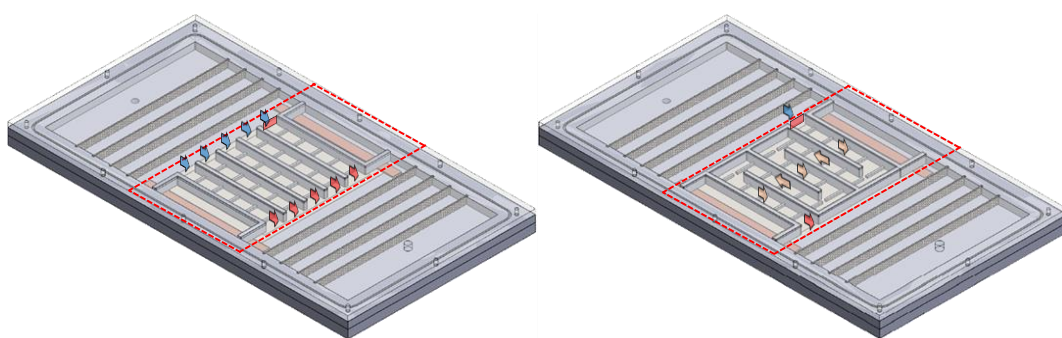
ต่อมาเป็นการอธิบายถึงรูปแบบของครีบบนพื้นผิวและลักษณะช่องการไหลที่ถูกติดตั้งบนพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของส่วนทดสอบ เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบแต่ละรูปแบบ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งครีบอกออกเป็น 3 กลุ่มหลักตามลักษณะการวางขวางการไหลของน้ำ ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ครีบบนพื้นผิววางตั้งฉากกับการไหลหรือครีบบนมุม 90° กลุ่มที่ 2 ครีบบน

เอียงกับการไหลที่มุม  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  และ  $60^{\circ}$  กลุ่มสุดท้าย ครีบริปตัววีที่ทำมุมภายใน  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  และ  $60^{\circ}$  ตามลำดับ โดยครีบริปสร้างความปั่นป่วนทั้ง 3 กลุ่มนั้นยังถูกแบ่งออกเป็นครีบริปแบบต่อเนื่อง (Continuous ribs) และ ครีบริปแบบแตก (Broken ribs) อีกด้วย ทำให้ในงานวิจัยนี้มีรูปแบบของครีบริปที่ใช้ทดสอบทั้งสิ้น 14 รูปแบบ ซึ่งครีบริปสร้างความปั่นป่วนที่นำมาศึกษานี้ทำมาจากแท่งอะคริลิกใสซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำจึงไม่นำมาพิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนสู่หน้าที่ไหลผ่านและหน้าตัดของครีบริปทุกรูปแบบนั้นจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  และออกแบบให้อัตราส่วนความสูงครีบริปต่อความสูงช่องการไหลเท่ากับ 0.25 ครีบริปทั้ง 14 รูปแบบที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปร่างของครีบริปสร้างความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

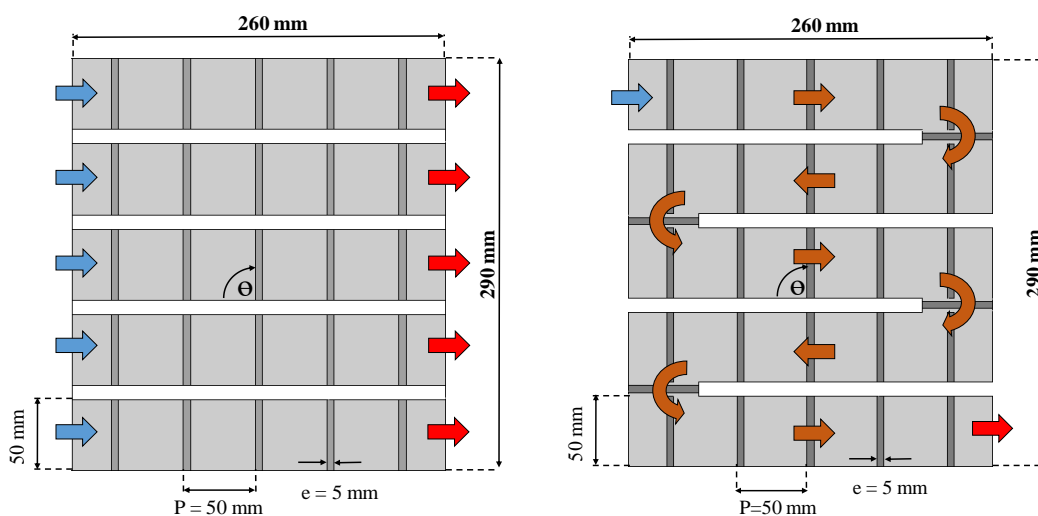
สำหรับช่องการไหลซึ่งถูกติดตั้งบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนนั้น มีไว้เพื่อบังคับทิศทางการไหลของน้ำบริเวณพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้ช่องการไหล 2 ลักษณะ คือ ช่องการไหลแบบขนาน (Parallel channel) โดยน้ำที่มาจากทางน้ำเข้าของส่วนทดสอบ จะถูกแบ่งเข้าสู่ช่องการไหลย่อยทั้ง 5 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และช่องการไหลแบบวกกลับ (Serpentine channel) จะมีหน้าตัดช่องการไหลที่เข้าสู่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนเพียง 1 ช่อง โดยน้ำที่ไหลในช่องการไหลลักษณะนี้จะถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทาง (วกกลับ) ตามลักษณะของช่องการไหลรวมทั้งสิ้น 4 กลับ ช่องการไหลแบบวกกลับดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) ซึ่งลักษณะช่องการไหลที่ต่างกัน จะส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันด้วยโดยในช่องการไหลทั้ง 2 ลักษณะนั้นจะมีการติดตั้งแถวของครีบสร้างความปั่นป่วนอยู่ภายในและเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลเท่ากัน ลักษณะการไหลของน้ำในช่องการไหลทั้ง 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 3.6



(ก) ช่องการไหลแบบขนาน

(ข) ช่องการไหลแบบวกกลับ

รูปที่ 3.5 ลักษณะช่องการไหลที่ใช้ในการทดลอง



(ก) ช่องการไหลแบบขนาน

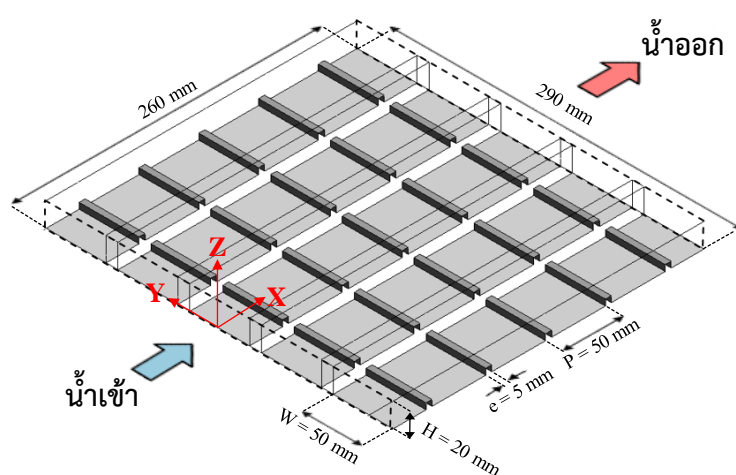
(ข) ช่องการไหลแบบวกกลับ

รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลของน้ำบริเวณพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลทั้ง 2 แบบ



ตารางที่ 3.2 ขนาดของครีบบนและช่องการไหลที่ใช้ในส่วนทดสอบของงานวิจัย

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
1.ความกว้างและความสูงของครีบบน	e	5 mm
2.ความกว้างของช่องการไหลบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	W	50 mm
3.ความสูงของช่องการไหลบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	H	20 mm
4.อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล	W/H	2.5
5.เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล	$D_h$	28 mm
6.อัตราส่วนความสูงครีบบนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก	$e/D_h$	0.18
7.ระยะพิทของครีบบน	p	50
8.ลักษณะช่องการไหล	ช่องการไหลแบบขนาน ช่องการไหลแบบวกกลับ	
9.รูปแบบครีบบน	ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก มุม 90° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก มุม 30° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก มุม 45° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก มุม 60° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก รูปตัววีมุม 30° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก รูปตัววีมุม 45° ครีบบนแบบต่อเนื่อง/แตก รูปตัววีมุม 60°	



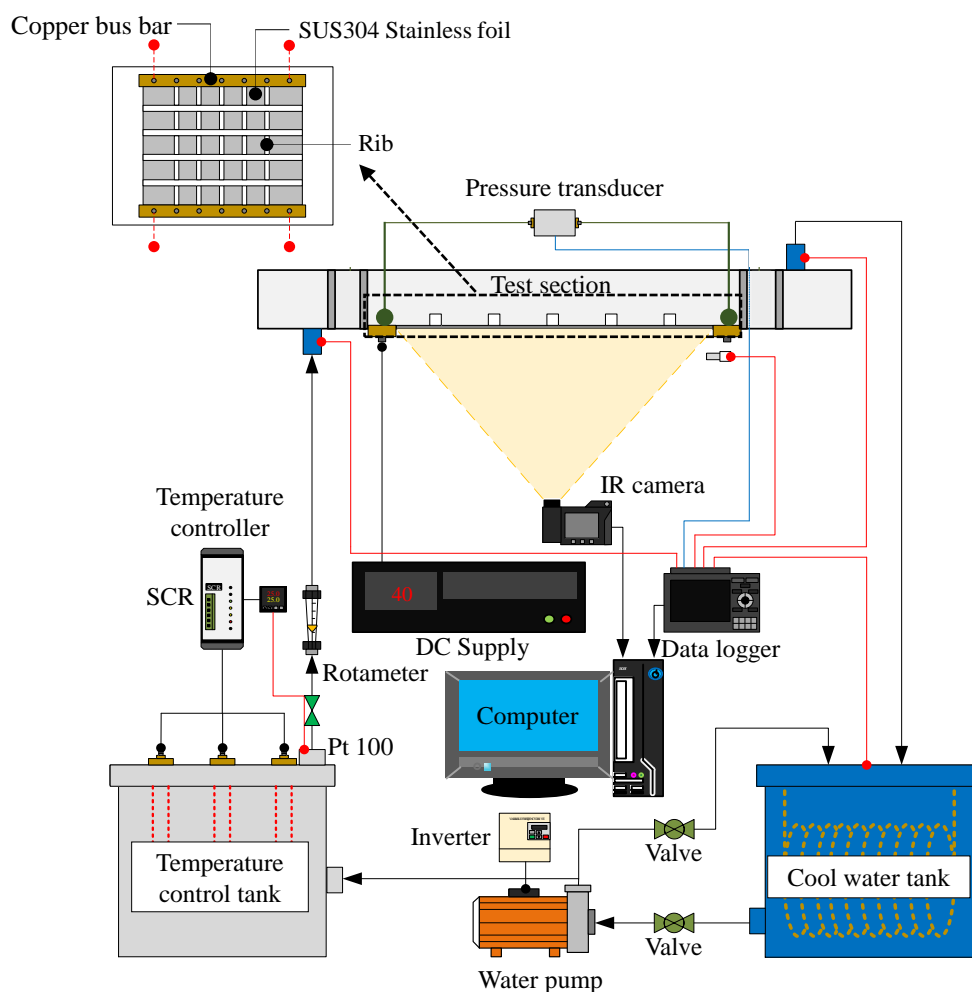
รูปที่ 3.7 โมเดลแสดงช่องการไหลที่ติดครีบบนสร้างความปั่นป่วน

### 3.1.2 วิธีทดสอบการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ

ในการทดลอง น้ำที่อุณหภูมิ  $25 \pm 0.1$  °C จากถังควบคุมอุณหภูมิจะไหลผ่านวาล์วและอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ซึ่งได้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ทดลองที่ 4, 8 และ 12 LPM ในทุกรูปแบบการติดตั้งครีบและช่องการไหล เมื่อน้ำไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบบริเวณทางน้ำเข้า น้ำจะไหลผ่านตะแกรงรูซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3 mm เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล น้ำจะไหลต่อไปยังบริเวณพื้นที่ถ่ายเทความร้อนซึ่งมีการติดครีบและช่องการไหลบนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสบาง โดยที่แผ่นสแตนเลสนี้เป็นบริเวณที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $300 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปยังแท่งทองแดงที่ซึ่งแผ่นสแตนเลสทำให้บริเวณนี้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะไหลออกจากส่วนทดสอบที่ทางน้ำออกและกลับเข้าสู่ถังน้ำเย็น ภายในถังน้ำเย็นนั้นจะบรรจุชุดท่อทองแดงที่ภายในมีน้ำอุณหภูมิ  $18 \pm 0.5$  °C ไหลเวียนอยู่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังน้ำเย็นและส่งผลให้น้ำในถังน้ำเย็นมีอุณหภูมิที่  $23 \pm 0.5$  °C โดยในการทดลองจะวัดลักษณะการกระจายอุณหภูมิตั้งแต่บนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสโดยวิธีการถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรดที่บริเวณพื้นผิวด้านหลังของแผ่นสแตนเลส วัดค่าอุณหภูมิน้ำขาเข้า-ออกส่วนทดสอบ อุณหภูมิห้องทดลองด้วยหัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100 แล้วบันทึกลงในเครื่องเก็บข้อมูลและวัดค่าการสูญเสียความดันด้วยทรานสดิวเซอร์ความดัน รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพชุดทดสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบและตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อได้ค่าทางอุณหภูมิและค่าการสูญเสียความดันเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจึงเป็นขั้นตอนการแปลงค่า คือ ภาพการกระจายของอุณหภูมิตั้งแต่บนพื้นผิวที่ติดครีบ (Temperature distribution) ในแต่ละตำแหน่งนั้นจะถูกแปลงเป็นการกระจายของค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (Nusselt number distribution) โดยใช้โปรแกรมคำนวณที่เขียนด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 3.1.4 สำหรับค่าการสูญเสียความดันที่ได้วัดนั้นจะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction factor) ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียพลังงานจากการติดตั้งครีบแต่ละรูปแบบ การจะพิจารณาว่ารูปแบบครีบและช่องการไหลลักษณะใดที่เหมาะสมจะนำไปติดตั้งในตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T นั้นจะต้องพิจารณาจากอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ต่ออัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานบนพื้นผิวที่ติดครีบ หรือเรียกว่า สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance) โดยสูตรการคำนวณค่านัสเซลต์นัมเบอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนจะแสดงในหัวข้อถัดไป





รูปที่ 3.8 แผนภาพชุดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
1. อัตราการไหลของน้ำ	$Q$	4, 8, 12 LPM
1.1 เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับช่องการไหลแบบขนาน	$*Re$	400, 800, 1200
1.2 เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับช่องการไหลแบบวกกลับ	$*Re$	2000, 4000, 6000
2. อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าส่วนทดสอบ	$T_i$	$25 \pm 0.1$ °C
3. อุณหภูมิของห้องทดลอง	$T_{am}$	$25 \pm 0.1$ °C
4. ค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่	$\dot{q}$	$300$ W/m <sup>2</sup>
4.1 ค่ากระแสไฟฟ้า	$I$	38.95 A
4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า	$V$	0.63 V

หมายเหตุ \*Re คำนวณจากสมการที่ 3.6

### 3.1.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านท่อทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบาง จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งอัตราการเกิดความร้อน ( $\dot{Q}_{input}$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{input} = IV \quad (3.1)$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดระหว่างแท่งทองแดงที่ขึงแผ่นสแตนเลส

สำหรับการทดลองนี้ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องไหลผ่านพื้นผิวแผ่นสแตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว ( $h$ ) ได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_m)} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\dot{Q}_{losses}$  คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนจากผิวทดสอบไปสู่บรรยากาศ

$A$  คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ( $0.075 \text{ m}^2$ )

$T_w$  คือ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นสแตนเลสที่วัดด้วยกล้องอินฟราเรด

$T_m$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำก่อนและหลังไหลผ่านส่วนทดสอบ

จากนั้นสามารถคำนวณค่าตัวเลขนัสเซลต์ (Nusselt number,  $Nu$ ) บนพื้นผิวได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3.3)$$

โดยที่  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล 1 ช่อง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ  $D_h = 2WH / (W + H)$

$W$  คือ ความกว้างของช่องการไหล 1 ช่อง (50 mm)

$H$  คือ ความสูงของช่องการไหล (20 mm)

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย

สำหรับตัวประกอบความเสียดทานบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{2(\Delta P)(D_h)}{\rho V_i^2 L} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\Delta P$  คือ ค่าความดันลดที่วัดระหว่างทางเข้า-ออก ของส่วนทดสอบ  
 $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย  
 $V_i$  คือ ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนทดสอบ  
 $L$  คือ ความยาวในช่วงที่วัดความดันระหว่างทางเข้า-ออก ของส่วนทดสอบ

สำหรับการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนนั้นจะเปรียบเทียบจากอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าไนส์เชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่อผลอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานบนพื้นผิวซึ่งเรียกว่า สมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta$ ) ดังสมการ

$$\eta = \frac{\left(\frac{\overline{Nu}}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3}} \quad (3.5)$$

โดยที่สมรรถนะเชิงความร้อนเป็นการเปรียบเทียบความสามารถการถ่ายเทความร้อนที่เงื่อนไขการสูญเสียความดันเดียวกัน (หรือพลังงานขับปั๊มเท่ากัน)  $\overline{Nu}/Nu_0$  คือ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบเทียบกับพื้นผิวเรียบ (ไม่ติดครีบ) โดยค่า  $\overline{Nu}/Nu_0$  สูง หมายถึง การติดครีบรูปแบบนั้นๆสามารถระบายความร้อนบนพื้นผิวได้ดีและค่า  $\overline{Nu}/Nu_0$  ต่ำ หมายถึง การติดครีบรูปแบบนั้นๆสามารถระบายความร้อนบนพื้นผิวได้น้อย  $f/f_0$  คือ อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานบนพื้นผิวที่ติดครีบเทียบกับพื้นผิวเรียบ (ไม่ติดครีบ) แสดงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นในระบบส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการขับปั๊ม โดยค่า  $f/f_0$  สูง หมายถึง การติดครีบรูปแบบนั้นๆให้ค่าการสูญเสียความดันที่มากส่งผลให้ต้องเลือกใช้ปั๊มหขนาดใหญ่มี่มีกำลังสูงและ  $f/f_0$  ต่ำ หมายถึงการติดครีบรูปแบบนั้นๆให้ค่าการสูญเสียความดันที่น้อยส่งผลทำให้สามารถเลือกใช้ปั๊มที่มีขนาดเล็กได้

สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของการไหลในส่วนทดสอบสามารถคำนวณจากสมการ

$$Re = \frac{\overline{V}D_h}{\nu} \quad (3.6)$$

โดยที่  $\bar{V}$  คือ อัตราเร็วการไหลของน้ำที่ไหลเข้าสู่ช่องการไหล  
 $\nu$  คือ ความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity) ของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย

### 3.1.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพความร้อน

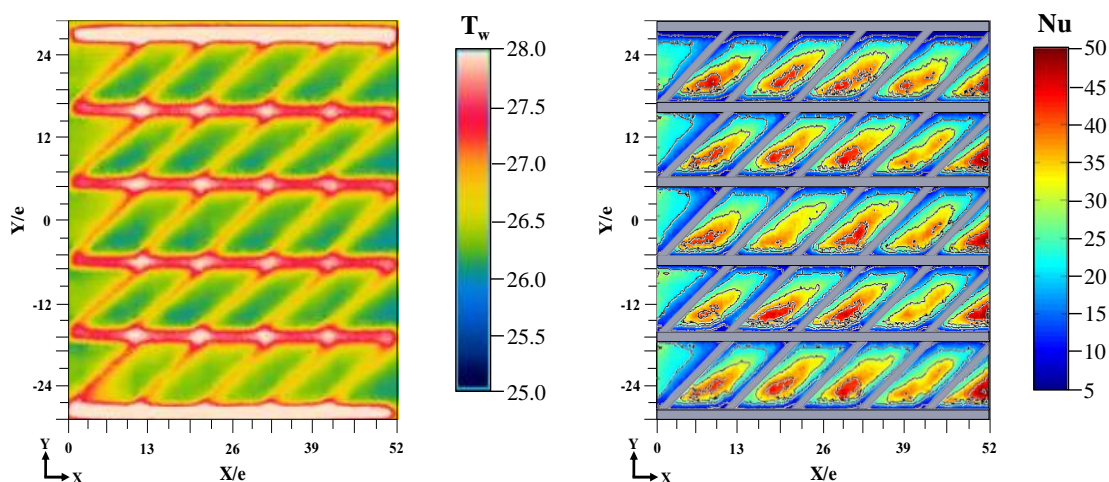
ในการหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่าตัวเลขเคลื่อนที่บนพื้นผิวสามารถทำได้โดยนำภาพที่ได้จากการถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวผ่านสแตนด์เลสด้วยกล้องอินฟราเรด มาวิเคราะห์ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมที่เขียนในซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีรายละเอียดดังนี้

(1) เลือกภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องอินฟราเรดที่เงื่อนไขพลักซ์ความร้อนคงที่  $300 \text{ W/m}^2$  โดยภาพถ่ายความร้อนจะแสดงสีอุณหภูมิในช่วง  $25^\circ\text{C} \leq T \leq 28^\circ\text{C}$

(2) แปลงไฟล์ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนเป็นไฟล์นามสกุล CSV

(3) โหลดไฟล์ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมินามสกุล CSV ที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.6

(4) ได้ภาพการกระจายตัวเลขเคลื่อนที่บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



(ก) ภาพถ่ายอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด

(ข) การกระจายของค่าตัวเลขเคลื่อนที่

รูปที่ 3.9 การแปลงภาพถ่ายอุณหภูมิเป็นภาพการกระจายค่าตัวเลขเคลื่อนที่บนพื้นผิว

### 3.2 การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ

การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ เป็นการจำลองการไหลของน้ำผ่านส่วนทดสอบที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งในการสร้างโมเดลส่วนทดสอบที่ติดตั้งครีบและช่องการไหล การกำหนดเงื่อนไขของการทดสอบ และการจำลองนั้นได้ใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ในการศึกษาครั้งนี้ โดยในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการติดครีบและช่องการไหลแต่ละรูปแบบระหว่างการจำลองกับการทดลองและใช้ลักษณะการไหลของน้ำผ่านครีบนั้นอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบจะอธิบายดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.2.1 สมการควบคุมการไหล

พฤติกรรมกรการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (Reynolds Averaged Continuity Equation) สมการ Reynolds Averaged Navier Stokes (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Reynolds Averaged Energy Equation) ซึ่งเป็นสมการควบคุมการไหลแบบคงที่ 3 มิติ และเป็นกรการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) สมการควบคุมการไหลแบบปั่นป่วนในการคำนวณที่ผ่านกระบวนการ Reynolds Averaged ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง Reynolds Averaged (Continuity Equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

สมการ Reynolds Averaged Navier Stokes (Momentum equation)

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{V_i' V_j'} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

สมการพลังงาน Reynolds Averaged (Energy Equation)

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{V_i' T'} \right] \quad (3.9)$$

โดยที่  $c_p$  คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่  
 $U_i, U_j$  คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย  
 $\tau$  คือ อุณหภูมิของของไหล

### 3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Shear stress transport k- $\omega$  model (SST k- $\omega$  model) พัฒนาโดย Menter's ได้รวมเอาแบบจำลอง 2 ชนิด ผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- $\epsilon$  model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นไกลจากผนัง (Outer layer) และการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- $\omega$  model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นชิดผนัง (Inner layer) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งการสับเปลี่ยนแบบจำลองสามารถทำได้โดยใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง

นอกจากนี้แบบจำลองแบบ SST k- $\omega$  model ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy viscosity โดยการบังคับค่า Turbulent shear stress ให้มีขอบเขตการปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient, Airfoils และ Transonic shock-waves ได้ดีขึ้น

สมการพลังงานความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j k)}{\partial x_j} = \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.10)$$

สมการอัตราการสลายตัวเฉพาะ (Specific dissipation rate,  $\omega$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\alpha}{\nu_t} \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ &+ 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3.11)$$

สมการ Blending function,  $F_1$

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (3.12)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad (3.13)$$

สมการความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

$$\mu_t = \min\left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{SF_2}\right); a_1 = 0.31 \quad (3.14)$$

สมการ Blending function,  $F_2$

$$F_2 = \tanh\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)\right]^2 \quad (3.15)$$

สำหรับ Blending function,  $F_1$  มีค่าเท่ากับ 1 ที่ขอบชั้นขีตผิวและมีค่าเข้าสู่ 0 เมื่อห่างออกจากขอบของชั้นขีตผิว (Free stream)

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านในชั้นขีตผิว (Inner layer)

$$\sigma_k = 1.176, \sigma_{\omega} = 2, \alpha = 0.5532, \beta = 0.075 \text{ และ } \beta^* = 0.09$$

2. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอกชั้นขีตผิว (Outer layer)

$$\sigma_k = 1, \sigma_{\omega 2} = 1.168, \alpha = 0.4403, \beta = 0.0828 \text{ และ } \beta^* = 0.09$$

โดยที่	$\tau_w$	คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress)
	$\sigma_k$	คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน
	$\sigma_{\omega}$	คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราสลายเฉพาะ
	$\nu_t$	คือ ความหนืดไหลวนคิเนเมติก (Kinematic eddy viscosity)
	$CD_{k\omega}$	คือ การแพร่ผ่านในแนวขวาง (Cross-diffusion)

### 3.2.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง

การไหลในกลุ่มที่มีผนังที่เป็นของแข็งมาเกี่ยวข้องทำให้มีโครงสร้างที่แตกต่างจากการไหลปั่นป่วนแบบอิสระ ระบบตัวแปรไร้มิติจึงได้นำมาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาความเชื่อมโยงของผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับการไหลของของไหลที่ขอบขีดผนังจะประกอบไปด้วยบริเวณหลัก 2 บริเวณคือ บริเวณชั้นใน (Inner layer) ซึ่งมีระยะประมาณ 10% ถึง 20% ของชั้นความหนาขีดผนัง ค่าของความเค้นเฉือนเกือบจะคงที่ และมีค่ากับความเค้นเฉือนที่ผนัง  $\tau_w$  ชั้นนี้จะมีชั้นย่อยๆ 3 ชั้นคือ Linear sub-layer ซึ่งความหนืดมีอิทธิพลหลักต่อการไหล ชั้นที่สอง Buffer layer ทั้งความหนืดและความปั่นป่วนมีอิทธิพลต่อการไหลในระดับเกือบเท่ากัน และชั้นที่สามคือ Log-law ความปั่นป่วนเป็นตัวการหลักที่ส่งผลต่อความเค้นเฉือนสำหรับบริเวณชั้นนอก (Outer layer) หรือ Law of the wake เป็นบริเวณที่การไหลได้รับอิทธิพลของความเฉื่อยของการไหลเป็นหลัก และเป็นอิสระต่อปัจจัยด้านความหนืดของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.10

สมการตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผนัง (Dimensionless wall distance,  $y^+$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$y^+ = \frac{yV_\tau}{\nu} \quad (3.16)$$

เมื่อ

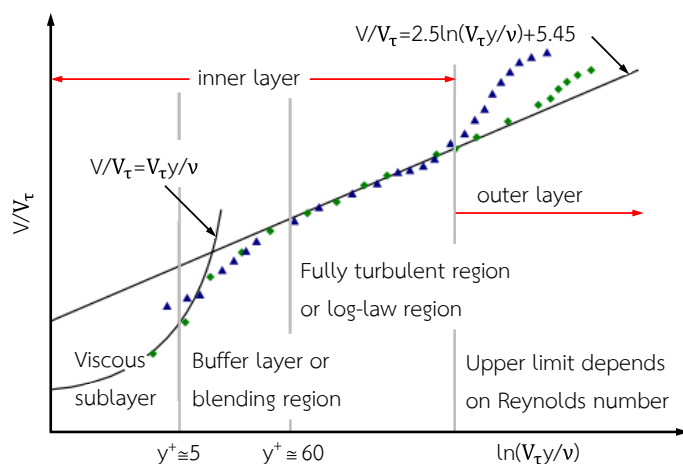
$$V_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.17)$$

ความเร็วไร้มิติ (Dimensionless velocity) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$V^+ = \frac{V}{V_\tau} \quad (3.18)$$

โดยที่	$V$	คือ ความเร็ว (Velocity)
	$V_\tau$	คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity)
	$\tau_w$	คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress)
	$y$	คือ ระยะห่างจากชั้นขีดผนัง

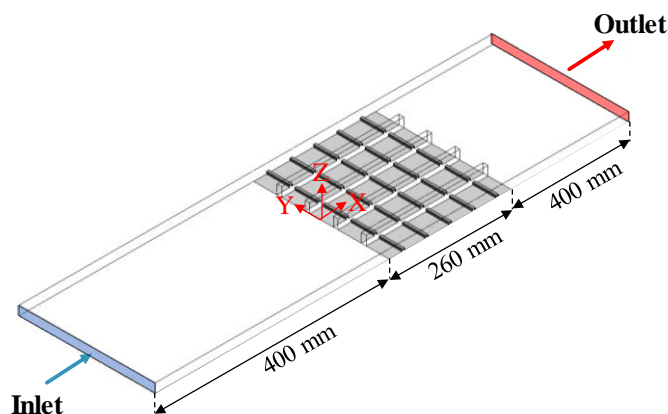




รูปที่ 3.10 การกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง

### 3.2.4 การสร้างแบบจำลองและกริด

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) โดยสร้างแบบจำลอง 3 มิติของของไหลให้เหมือนกับการทดลองโดยแบบจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะของช่องการไหล คือ แบบจำลองที่มีช่องการไหลแบบขนาน (Parallel channel) และแบบจำลองการไหลที่มีช่องการไหลแบบวกกลับ (Serpentine channel) โดยในแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบได้แบ่งพื้นที่ของโมเดลช่องการไหลเป็น 3 ส่วน (เหมือนกับชุดทดสอบการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน) คือ ส่วนที่ 1 ของแบบจำลองเป็นส่วนของทางน้ำเข้า (Inlet) มีระยะจากปากทางเข้าถึงพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่มีการติดตั้งครีบ ยาว 400 mm ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (Heat transfer surface) ที่มีการติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วน ยาว 260 mm ต่อมา ส่วนที่สุดท้าย ทางน้ำออก (Outlet) เป็นระยะหลังกระแสการไหลหรือหลังจากช่องการไหลยาว 400 mm โดยตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.11 และเงื่อนไขตัวแปรในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการติดตั้งครีบบนผนังแบบต่อนิ่งมุม  $90^\circ$  ในช่องการไหลแบบขนาน

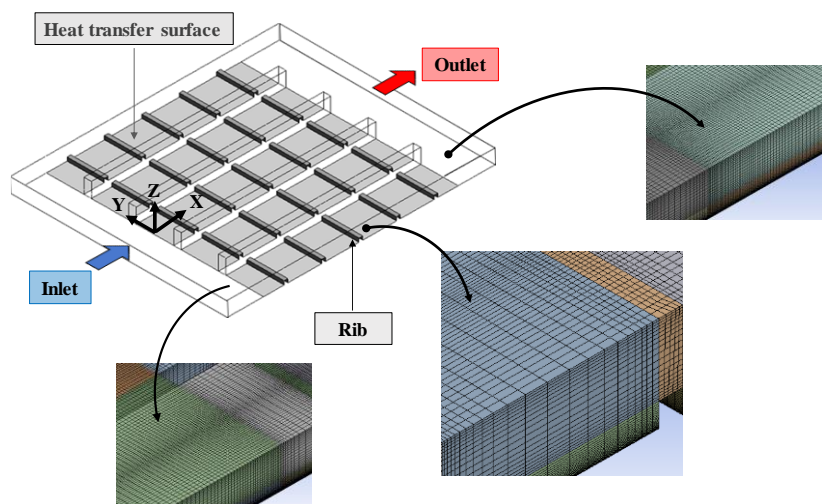
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ

ตัวแปร	ช่องการไหลแบบขนาน	ช่องการไหลแบบวกกลับ
1.รูปแบบของครีบ (ต่อเนื่อง/แตก)		
1.1 ครีบตั้งฉากกับการไหล	มุม 90°	มุม 90°
1.2 ครีบเอียงทำมุมกับการไหล	มุม 30°, 45° และ 60°	มุม 30°, 45° และ 60°
1.3 ครีบบรูปตัววี	มุม 30°, 45° และ 60°	มุม 30°, 45° และ 60°
2.อัตราการไหลของน้ำ (Q)	4 LPM (Re=400)	4 LPM (Re=2000)
3.หน้าตัดของครีบ (กว้าง x สูง (e))	5 mm x 5 mm	5 mm x 5 mm
4.อัตราส่วนระยะพิท ต่อความสูงครีบ (p/e)	10	10
5.ขนาดหน้าตัดของช่องการไหล (W x H)	50 mm x 20 mm	50 mm x 20 mm
6.เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ ของช่องการไหล ( $D_h$ )	28 mm	28 mm

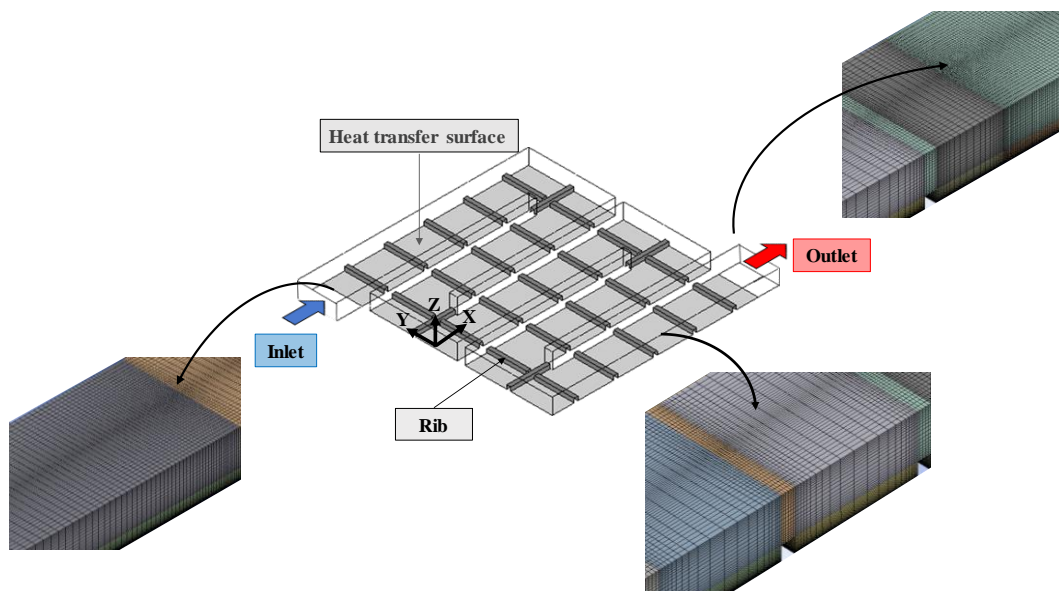
กริด (Mesh) ที่ใช้ในแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมผืนผ้าลักษณะกริดของแบบจำลองทั้งสองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13 โดยบริเวณใกล้ทางเข้าของช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีบและบริเวณระหว่างครีบจะมีความละเอียดสูง ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องการความละเอียดในการคำนวณสูง บริเวณใกล้ทางเข้าของช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีบและบริเวณระหว่างครีบมีลักษณะกริดเป็นชั้น ๆ ซึ่งมีความละเอียดสูงจากปลายทั้งสองข้าง ความละเอียดจะลดลงเมื่อห่างจากบริเวณปากทางออกของครีบ ในขั้นตอนการสร้างกริดนี้ ได้กำหนดพื้นผิวของแบบจำลองเพื่อสร้างเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ

สำหรับการไหลบริเวณใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อน (Heat transfer surface) ซึ่งเป็นบริเวณที่ต้องการความแม่นยำสูงมีการกำหนดค่า  $y^+ \cong 5$  จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.10 คำนวณบริเวณใกล้ชั้นขีดผนัง (Near-wall) ของพื้นที่ระหว่างครีบ โดยการกำหนดอัตราส่วนของกริด (Mesh) บริเวณชั้นขีดผนังดังต่อไปนี้

- จำนวนแถวที่ต้องการแบ่งกริด (Number of divisions) เท่ากับ 100
- อัตราส่วนการแบ่งกริด (Bias factor) เท่ากับ 10



รูปที่ 3.12 รูปแบบกริดของแบบจำลองการไหลที่ติดครีบบนช่องบังคับการไหลแบบขนาน

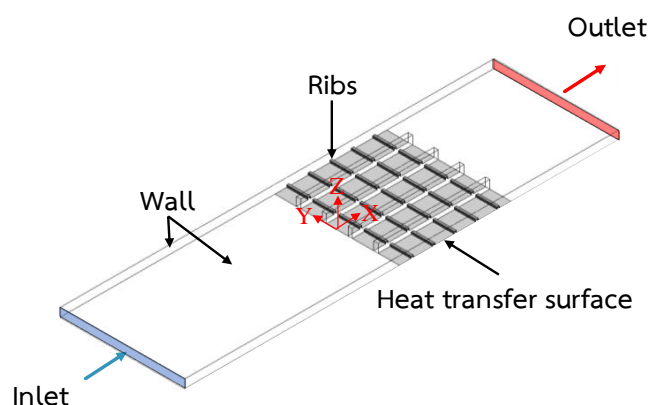


รูปที่ 3.13 รูปแบบกริดของแบบจำลองการไหลที่ติดครีบบนช่องบังคับการไหลแบบวกกลับ

### 3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการจำลองการไหลของช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีบบนผิวได้วิเคราะห์การไหลเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อน และไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วงและสำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง Shear stress transport  $k-\omega$  model (SST  $k-\omega$  model) เนื่องจากสามารถทำนายได้ค่อนข้างแม่นยำและใช้หน่วยความจำเพื่อการประมวลผลของคอมพิวเตอร์น้อย

รูปที่ 3.14 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล (Boundary condition) ของแบบจำลองส่วนทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ 1 Inlet คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดอัตราการไหลของทางเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ 4 LPM บริเวณที่ 2 Wall คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นผนังการไหลซึ่งไม่มีการไหล ไม่มีการเคลื่อนที่และไม่พิจารณาผลการถ่ายเทความร้อน บริเวณที่ 3 Heat transfer surface คือ บริเวณพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน (แผ่นสแตนเลสบางในส่วนทดสอบ) โดยกำหนดให้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนนั้นมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ  $300 \text{ W/m}^2$  บริเวณที่ 4 Ribs เป็นผนังของครีบบนที่ติดตั้งในช่องการไหล โดยกำหนดให้ผนังของครีบบนไม่มีการไหล ไม่เคลื่อนที่และไม่พิจารณาผลการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic) ส่วนสุดท้าย Outlet คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจ เท่ากับ  $0 \text{ Pa}$ )



รูปที่ 3.14 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองการไหล

เงื่อนไขของผนังของการไหล ความดันทางออก และความเร็วได้กำหนดดังต่อไปนี้  
เงื่อนไขขอบเขตทางเข้า (Inlet)

- (1) กำหนดความเร็วของการไหลเท่ากับการทดลองจริงที่อัตราการไหล 4 LPM
  - (2) กำหนดอุณหภูมิของน้ำทางเข้าเท่ากับ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $298 \text{ K}$ ) ซึ่งเท่ากับการทดลองจริง
- เงื่อนไขขอบเขตพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (Heat transfer surface)
- (1) กำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่  $300 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเท่ากับการทดลองจริง
  - (2) กำหนดให้ผนังไม่มีการไหลหรือเคลื่อนที่ (No slip condition)

เงื่อนไขขอบเขตทางออก

- (1) กำหนดอุณหภูมิทางออกของช่องการไหลเท่ากับ  $27^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{ K}$ )
- (2) กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ  $0\text{ Pa}$ )

### 3.2.6 วิธีกรคำนวณ

สำหรับวิธีกรคำนวณ ได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดตามตารางที่ 3.5 โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$

ตารางที่ 3.5 การกำหนด Scheme ของแต่ละสมการ

สมการ	Scheme
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second order upwind
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy, $k$	Second order upwind
Specific dissipation rate, $\omega$	Second order upwind
Energy	Second order upwind

จากที่ได้กล่าวไปในตอนต้น การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบนั้น จะใช้เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนกับการทดลองในส่วนที่ 1 ดังนั้นผลการจำลองการไหลจึงแสดงออกเป็น 2 ส่วน คือ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบนแต่ละรูปแบบในช่องการไหลแบบขนานและแบบวกกลับ (การกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน) ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลอง ส่วนที่ 2 คือ การแสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity profile) ในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดการไหลบนพื้นผิวที่ติดครีบบ เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลอง ซึ่งผลการจำลองลักษณะการไหลนี้จะแสดงในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2 ผลการศึกษาการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบบ

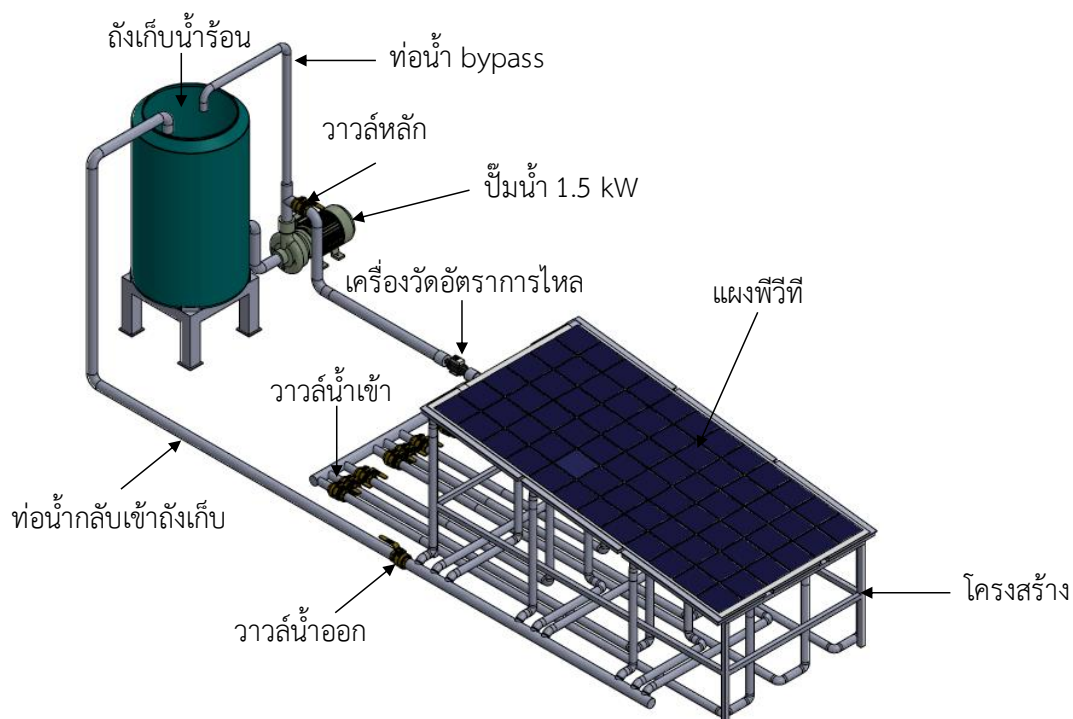
### 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่มีการปรับปรุงติดตั้งและช่องการไหลของน้ำในตัวเก็บความร้อน

การศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งและช่องการไหลในตัวเก็บความร้อนนี้ เป็นส่วนสุดท้ายในขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพของแผง PV/T ซึ่งเป็นการนำรูปแบบและลักษณะช่องการไหลที่ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากการศึกษาในสองส่วนแรกมาประยุกต์ติดตั้งลงในโมดูลระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงความร้อนออกจากแผง โดยในการทดสอบนั้นแผง PV/T ที่ปรับปรุงติดตั้งเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนในโมดูลระบายความร้อนนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแผง PV แบบทั่วไปซึ่งใช้ในการอ้างอิงระบบ ซึ่งการทดสอบจะทำที่สภาวะการใช้งานจริง ณ ดาดฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยรายละเอียดชุดทดสอบและวิธีการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ

#### 3.3.1 ชุดทดสอบแผง PV/T

แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือ แผง PV/T เป็นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic panel) ผสานเข้ากับโมดูลระบายความร้อน (Cooling module) ที่บริเวณด้านหลังของแผง ทำให้สามารถผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และน้ำร้อนจากโมดูลระบายความร้อน โดยจุดเด่นของโมดูลระบายความร้อนในงานวิจัยนี้คือ มีการติดตั้งครีบล้างความปั่นป่วนและช่องการไหลอยู่ภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนแบบบังคับ (Active convection heat transfer) ส่วนประกอบของชุดทดสอบแผง PV/T ดังแสดงในรูปที่ 3.15

ชุดทดสอบแผง PV/T นี้ ถูกติดตั้ง ณ ดาดฟ้า ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่  $7^{\circ} 00' 15.6''\text{N}$   $100^{\circ} 30' 65.4''\text{E}$  โดยแผงวางเอียงทำมุม  $7^{\circ}$  กับพื้นราบตามละติจูดของพื้นที่และหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อให้ได้รับแสงอาทิตย์ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยชุดทดสอบของแผง PV/T ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมดูลระบายความร้อน ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อน อุปกรณ์และเครื่องมือวัดภายในระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.15 โมเดลชุดทดสอบแผง PV/T

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic panel) ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) จะเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีที่มีแสงมาตกกระทบ ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน (Polycrystalline silicon) ขนาดกำลังไฟฟ้า 300 W ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันจำนวน 2 แผง โดยแผงหนึ่งจะถูกนำมาทำเป็นแผง PV/T ด้วยการติดตั้งโมดูลระบายความร้อนจำนวน 9 โมดูล ที่ด้านหลังของแผง และอีกแผงหนึ่งไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนใดๆเพื่อใช้เป็นแผงอ้างอิงในการทดสอบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.16





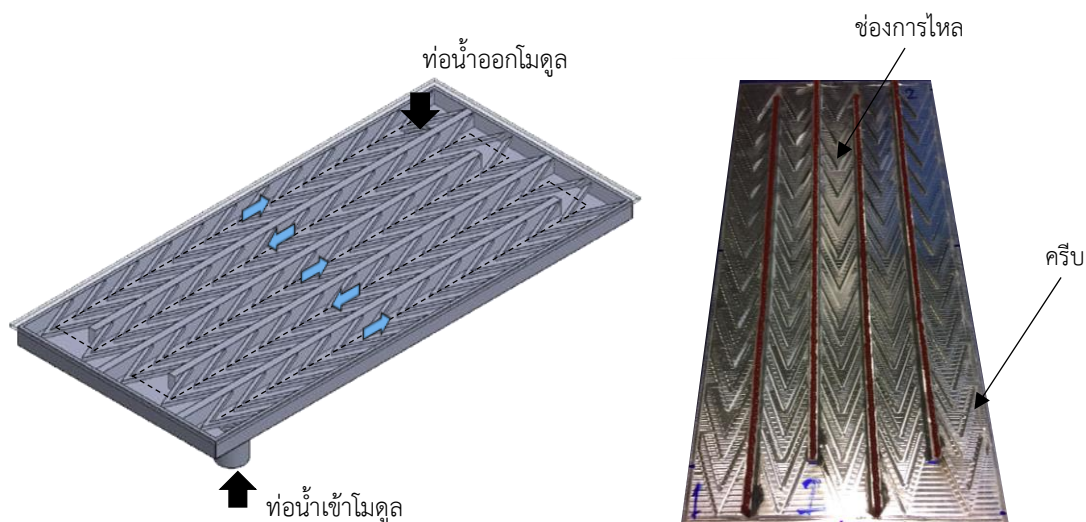
(ก) แผง PV/T



(ข) แผง PV (ใช้ในการอ้างอิง)

### รูปที่ 3.16 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ที่ใช้ในชุดทดสอบ

โมดูลระบายความร้อน (Cooling module) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับแผง PV/T ซึ่งจุดเด่นของโมดูลระบายความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ การเลือกรูปแบบครีบบทต่อเนื่องรูปตัววี มุม  $45^\circ$  ( $45^\circ$  continuous V ribs) ร่วมกับช่องการไหลแบบวกกลับ (Serpentine channel) ติดตั้งในโมดูลระบายความร้อน เมื่อน้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนไหลผ่านครีบบทนี้จะเกิดความปั่นป่วนบริเวณด้านหลังครีบบทและเหนี่ยวนำให้กระแสการไหลของน้ำให้ไหลเกาะติดพื้นผิวของโมดูลระบายความร้อนที่ติดกับแผง PV/T ทำให้ความสามารถในการดึงความร้อนเพิ่มขึ้น ลักษณะของโมดูลระบายความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.17



(ก) โมเดลของโมดูลระบายความร้อน (ข) ครีบบทและช่องการไหลในโมดูลระบายความร้อน

### รูปที่ 3.17 โมดูลระบายความร้อนที่ติดตั้งครีบบทต่อเนื่องรูปตัววี มุม $45^\circ$

และช่องการไหลแบบวกกลับ



ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อน (Water system) ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและเก็บน้ำร้อน โดยน้ำจะถูกลำเลียงจากถังเก็บขนาด 200 L ไปยังโมดูลระบายความร้อนด้วยปั๊มน้ำกระแสน้ำขนาด 1.5 kW น้ำจะถูกส่งออกจากปั๊มไปยังท่อที่ทำจาก PVC ขนาด 1.5 นิ้ว จำนวน 9 ท่อซึ่งแต่ละท่อได้ติดตั้งวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลก่อนเข้าโมดูลระบายความร้อนให้เท่ากันทุกโมดูล น้ำที่ไหลผ่านโมดูลความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลออกจากโมดูลระบายความร้อนไปยังท่อน้ำขาออกซึ่งทำจากท่อ PVC ขนาด 1.5 นิ้ว เช่นกัน โดยท่อน้ำขาออกนั้นได้เชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำร้อนและทั้งระบบนี้ได้รับการหุ้มฉนวนไว้อย่างดี ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อนดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ



(ก) ท่อน้ำขาเข้า



(ข) ท่อน้ำขาออก

รูปที่ 3.18 ระบบท่อน้ำขาเข้า-ออกซึ่งถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน



(ก) ถังเก็บน้ำร้อน



(ข) ระบบท่อน้ำเข้า-ออกที่ต่อกับกับแผง PV/T

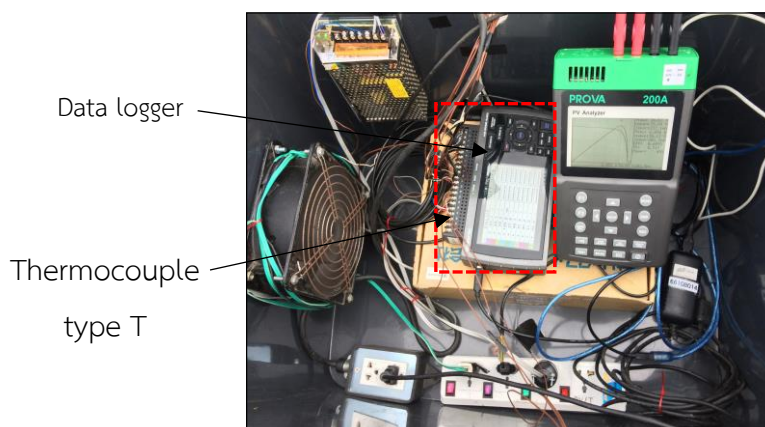
รูปที่ 3.19 ถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนและการติดตั้งระบบท่อของแผง PV/T

อุปกรณ์วัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV (PV analyzer) กำลังไฟฟ้าของแผง PV/T และแผง PV อ่างอิงนั้น ถูกวัดโดยเครื่อง I-V tracer ยี่ห้อ HT รุ่น I-V400W ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง 1000 W มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 1\%$  สำหรับค่าความเข้มแสง ถูกวัดโดยเครื่องวัดความเข้มแสง (Pyranometer) ยี่ห้อ HT รุ่น HT-304 ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง 1400  $W/m^2$  มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 3\%$  โดยค่าทางไฟฟ้านี้จะถูกวัดและบันทึกทุกๆ 20 นาทีตลอดระยะเวลาการทดสอบ อุปกรณ์วัดประสิทธิภาพของแผงดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงPV

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ชนิด T (Thermocouple type T) ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกตัวเก็บความร้อนและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ซึ่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ชนิด T นั้นมีช่วงการวัดที่  $-40$  ถึง  $350$   $^{\circ}C$  มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 0.5$   $^{\circ}C$  โดยค่าอุณหภูมิทุกตำแหน่งจะถูกวัดทุกๆ 20 นาทีและบันทึกลงในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger, ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL820) โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและเครื่องบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำแบบดิจิทัล (Digital flow meter, ยี่ห้อ SMC รุ่น PF3W711) ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าโมดูลตัวเก็บความร้อน โดยมีช่วงการวัดที่ 10 ถึง 100 LPM มีความถูกต้อง  $\pm 3\%$  รูปที่ 3.22 (ก) เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำแบบดิจิทัล ยี่ห้อ SCM รุ่น PF3W711

เกจวัดความดัน (Pressure gauge) ใช้วัดการสูญเสียความดันภายในระบบ โดยได้ติดตั้งในระบบ 2 จุด คือ ก่อนทางเข้าและหลังทางออกระบบน้ำของแผง PV/T โดยมีช่วงการวัดที่ 0 ถึง 1 bar รูปที่ 3.22 (ข) แสดงเกจวัดความดันที่ใช้วัดความดันลดในระบบ PV/T





(ก) เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำแบบดิจิทัล



(ข) เกจวัดความดัน

รูปที่ 3.22 เครื่องวัดอัตราการไหลและเกจวัดความดันที่ติดตั้งในระบบ PV/T

ตารางที่ 3.5 สรุปอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบ PV/T

ระบบ/อุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
1.แผงเซลล์แสงอาทิตย์		ยี่ห้อ: Full Solar รุ่น: FAL-300P กำลังไฟฟ้าสูงสุด: 300 W ขนาด: 1950 x 990 (mm) หน้าที่: ใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบแผง PV/T และแผงอ้ออิง
2.โมดูลระบายความร้อน		ลักษณะ: ภายในมีการติดตั้งครีบบทต่อเนื่องรูปตัววี มุม 45 ° และช่องการไหลแบบวกกลับ หน้าที่: ดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ในการทำน้ำร้อน
3.ระบบท่อน้ำขาเข้าแผง PV/T		ลักษณะ :เป็นท่อ PVC ต่อขนานกัน 9 ท่อ และมีการติดตั้งวาล์วน้ำเพื่อควบคุมอัตราการไหลก่อนเข้าตัวเก็บความร้อนแต่ละโมดูล หน้าที่: เป็นทางน้ำเข้าตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T
4.ระบบท่อน้ำขาออกแผง PV/T		ลักษณะ :เป็นท่อ PVC ต่อขนานกัน 9 ท่อ และมีท่อร่วมเพื่อนำน้ำกลับเข้าถังเก็บ หน้าที่: เป็นทางน้ำขาออกจากตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T และส่งน้ำต่อไปยังถังน้ำร้อน



ตารางที่ 3.5 สรุปอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบ PV/T (ต่อ)

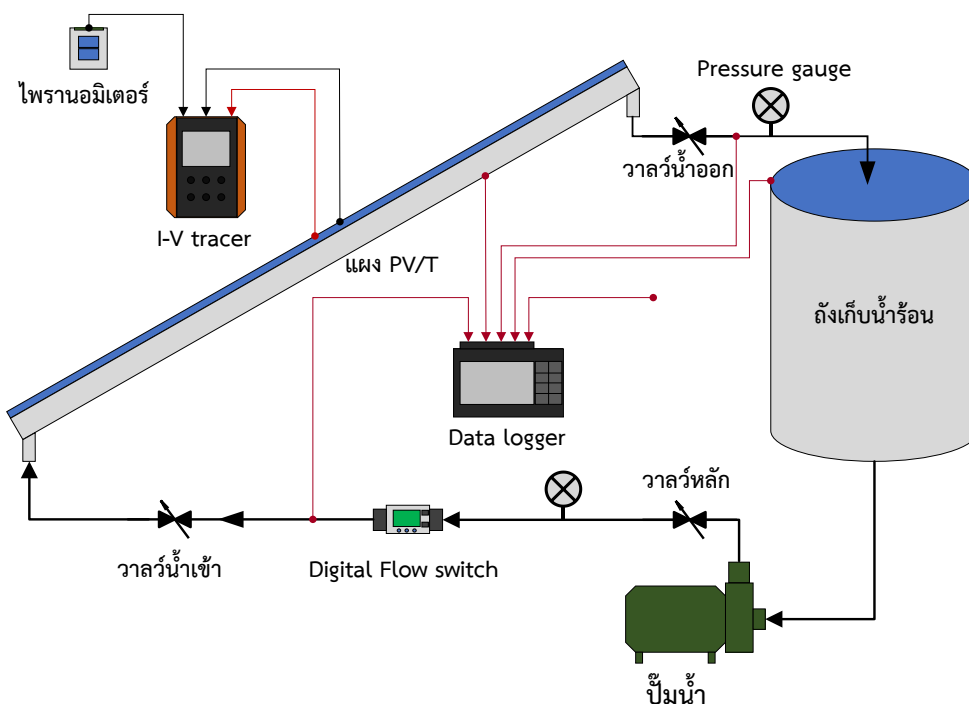
ระบบ/อุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
5. ถังน้ำร้อน		ลักษณะ: ถังน้ำทำจากวัสดุ PE ขนาดบรรจุ 200 L หน้าที่: บรรจุน้ำภายในระบบแผง PV/T เพื่อใช้เป็นน้ำร้อน
6. เครื่องวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้า		ยี่ห้อ: HT-instrument รุ่น: I-V400W ช่วงการวัด: 50 ถึง 1000 (W) ค่าความถูกต้อง: $\pm 1\%$ หน้าที่: วัดกำลังไฟฟ้าของแผง PV/T และแผง PV ที่ทดสอบ
7. เครื่องวัดความเข้มแสง		ยี่ห้อ: HT-instrument รุ่น: HT-304 ช่วงการวัด: 50 ถึง 1400 (W/m <sup>2</sup> ) ค่าความถูกต้อง: $\pm 3\%$ หน้าที่: วัดความเข้มแสง
8. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ชนิด T		ยี่ห้อ: Sang Chai Meter ช่วงการวัด: -40 ถึง 350 °C ค่าความถูกต้อง: $\pm 0.5$ °C หน้าที่: วัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.5 สรุปอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบ PV/T (ต่อ)

ระบบ/อุปกรณ์	ภาพประกอบ	รายละเอียด/หน้าที่
9. เครื่องเก็บข้อมูล		ยี่ห้อ: Graphtec รุ่น: GL-820 หน้าที่: บันทึกข้อมูล
10. เครื่องวัดอัตราการไหลแบบดิจิตอล		ยี่ห้อ: SMC รุ่น: PF3W711 ช่วงการวัด: 10 ถึง 100 LPM ค่าความถูกต้อง: $\pm 3\%$ หน้าที่: วัดอัตราการไหลน้ำ
11. เกจวัดความดัน		ยี่ห้อ: Sumo ช่วงการวัด: 0 ถึง 1 kPa ค่าความถูกต้อง: $\pm 2.5\%$ หน้าที่: วัดความดันที่ตำแหน่งท่อเข้า-ออก แผง PV/T

### 3.3.2 วิธีการทดสอบ

ชุดทดสอบแผง PV/T ถูกติดตั้ง ณ ดาดฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ซึ่งมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่  $7^{\circ}00'15.6''\text{N } 100^{\circ}30'65.4''\text{E}$  โดยแผงจะวางทำมุมเอียง  $7^{\circ}$  กับพื้นราบตามละติจูดของพื้นที่ การทดลองกระทำที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s โดยอ้างอิงตามค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของการไหลน้ำในช่องการไหลแบบววกกลับในส่วนของการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน ด้วยการปรับวาล์วหลักที่ติดตั้งบริเวณทางออกของปั้มน้ำ โดยการทดลองแต่ละอัตราการไหลจะเริ่มตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. ซึ่งแผนภาพชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนภาพชุดทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T

น้ำที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  จะถูกดูดจากถังเก็บน้ำร้อนขนาด 200 L ด้วยปั๊มน้ำ 1.5 kW น้ำจะถูกส่งออกจากปั๊มผ่านวาล์วหลักซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการไหลรวม แล้วไหลต่อไปยังท่อรวมน้ำเข้า ซึ่งได้แยกออกเป็นท่อย่อย 9 ท่อ ไปยังโมดูลระบายความร้อนทั้ง 9 โมดูลที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่เข้าสู่โมดูลระบายความร้อนจะไหลในช่องการไหลแบบวกกลับซึ่งได้ติดตั้งครีระบายความร้อนแบบต่อเนื่องรูปตัววี มุม  $45^{\circ}$  เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่ได้รับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลออกจากโมดูลความร้อนแต่ละโมดูลไปยังท่อรวมน้ำขาออกแล้วไหลต่อไปยังถังเก็บน้ำร้อน โดยในการทดลองนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าถูกวัดโดยเครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PV analyzer) ค่าความเข้มแสงถูกวัดโดยไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก โมดูลระบายความร้อนและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บถูกวัดโดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ชนิด T (Thermocouple type T) และบันทึกค่าลงเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ซึ่งทั้งค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิจะถูกวัดและบันทึกทุกๆ 20 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

### 3.3.3 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของแผง PV/T

จากข้อมูลการทดสอบของแผง PV และ PV/T ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. (9 ชั่วโมง/วัน) ทำให้สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันของแผง PV และ PV/T จากค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาและคำนวณค่าพลังงานความร้อนของแผง PV/T จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ

ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV และ PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{el} = P \times t \quad (3.19)$$

โดย  $E_{el}$  คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T ตลอดวัน (kWh/day)  
 $P$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดวัน (kW)  
 $t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (hr)

แต่เนื่องจากในการทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริง (Normal climate conditions) นั้น ความเข้มแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง PV และ PV/T ไม่คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง ดังนั้นการคำนวณพลังงานไฟฟ้าของระบบจึงจำเป็นต้องคำนวณจากผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$E_{el} = E_i + E_{i+1} + E_{i+2} \quad (3.20)$$

$$E_i = \frac{1}{2} \times (P_i + P_{i+1}) \times t \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots \quad (3.21)$$

โดยที่  $E_i$  คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงการวัด (kWh)  
 $P_i$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละช่วงการวัด (kW)  
 $t$  คือ ช่วงระยะเวลาของการวัดในแต่ละครั้ง (hr)

สำหรับพลังงานความร้อนของแผง PV/T สามารถคำนวณจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบ (08.00 น.) จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ (17.00 น.) ดังสมการ

$$E_{th} = mC_p (T_{water, final} - T_{water, start}) \quad (3.22)$$



โดยที่	$E_{th}$	คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำในถัง (kW/day)
	$m$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ (kg/s)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg°C)
	$T_{water, final}$	คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บ ณ เวลา 17.00 น. (°C)
	$T_{water, start}$	คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บ ณ เวลา 08.00 น. (°C)

นอกจากนี้ ในระบบ PV/T ซึ่งมีการไหลเวียนของน้ำเพื่อระบายความร้อนนั้น ได้ใช้ปั๊มน้ำกระแสสลับเพื่อลำเลียงน้ำในระบบ จึงมีการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อนำมาหักลบกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV/T และนำพลังงานสุทธิที่ได้นั้นไปคำนวณเป็นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าต่อไป พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{use} = \dot{m} \times \Delta P \times t \quad (3.23)$$

โดย	$E_{use}$	คือ ค่าพลังงานที่สูญเสียเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนน้ำของระบบ PV/T (kWh/day)
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำในระบบ PV/T (m <sup>3</sup> /s)
	$\Delta P$	คือ ค่าการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นในระบบ (N/m <sup>2</sup> )
	$t$	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (hr/day)

### 3.3.4 การคำนวณค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง PV/T

การประเมินความสามารถในการผลิตพลังงานของแผง PV/T นั้นถูกแสดงออกในรูปแบบของประสิทธิภาพชั่วขณะ ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้ต่อค่าพลังงานที่ได้รับ ณ ช่วงเวลานั้นๆ โดยประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV ในบางช่วงเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากน้ำที่กักเก็บไว้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ที่มีค่าติดลบ หมายถึง การที่เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T และแผง PV สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{el} = \frac{P}{I_T \times A_{PV}} \quad (3.24)$$

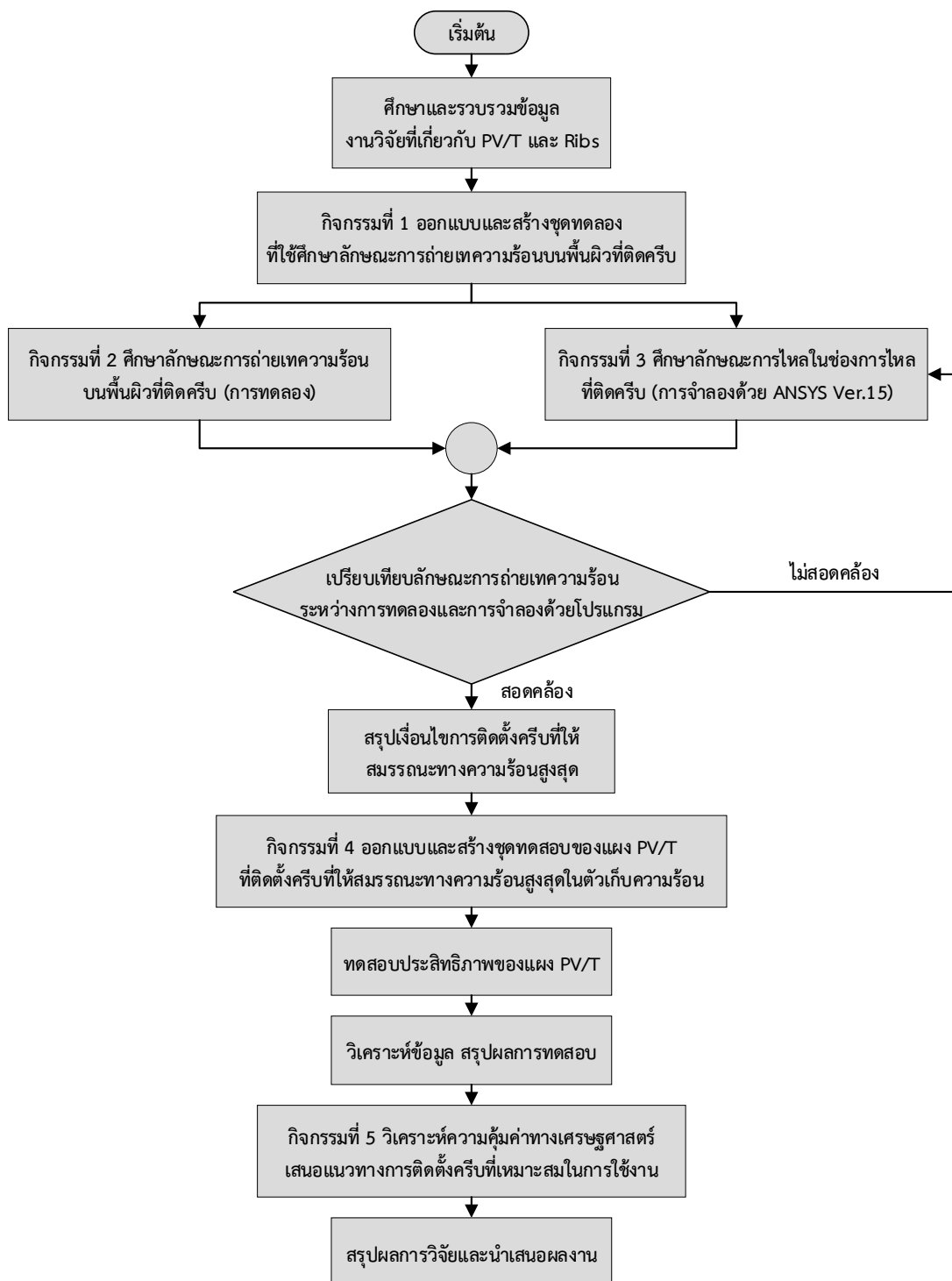
โดย	$\eta_{el}$	คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ
	$P$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้หักลบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับปั๊ม ณ เวลาที่ทำการวัด (W)
	$I_T$	คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ขณะที่ทำการวัดกำลังไฟฟ้า (W/m <sup>2</sup> )
	$A_{PV}$	คือ พื้นที่ของแผง PV, PV/T (m <sup>2</sup> )

ในทำนองเดียวกันประสิทธิภาพทางความร้อนของโมดูลระบายความร้อนที่ติดใต้แผงรับแสงอาทิตย์ อาจมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เนื่องจากค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของชั้นผิวที่เคลือบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงและอีกปัจจัยหนึ่งคือค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorption factor) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวัสดุที่ใช้ในการดูดกลืนรังสีของตัวเก็บความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะของโมดูลระบายความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{water,out} - T_{water,in})}{I_T \times A_{PV}} \quad (3.25)$$

โดย	$\eta_{th}$	คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะของแผง PV/T
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ (kg/s)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg°C)
	$T_{water,out}$	คือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าตัวเก็บความร้อน (°C)
	$T_{water,start}$	คือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกจากตัวเก็บความร้อน (°C)
	$I_T$	คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ขณะที่ทำการวัดอุณหภูมิ (W/m <sup>2</sup> )
	$A_{PV}$	คือ พื้นที่ของแผง PV/T (m <sup>2</sup> )

สำหรับการสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยใช้ครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.24 และในบทที่ 4 จะเป็นการแสดงผลการศึกษาของทั้ง 4 ส่วน



รูปที่ 3.24 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ เป็นผลการทดลองที่แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบในแบบต่างๆ นอกจากนั้นยังได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนเพื่อหารูปแบบครีบและช่องการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ เป็นการแสดงผลการจำลองการไหลที่ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ประกอบด้วยการแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองในส่วนแรก และการแสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำที่ไหลผ่านครีบซึ่งถูกแสดงในรูปของโปรไฟล์ความเร็วที่หน้าตัดในช่องการไหลเพื่อใช้อธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ส่วนที่ 3 คือ ผลการศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งครีบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลของโมดูลระบายความร้อน เป็นการแสดงผลของอุณหภูมิ กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของแผง PV/T เทียบกับแผง PV ที่ใช้ในการอ้างอิงด้วยการทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริง ส่วนสุดท้าย คือ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เป็นการเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนของการติดตั้งแผง PV/T กับแผง PV ที่ใช้ในการผลิตพลังงานของระบบ

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบ

ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบถูกแสดงในรูปของการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ ทำให้ทราบบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำระหว่างครีบ การสูญเสียความดันในช่องการไหลที่ติดครีบ รวมถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนถูกคำนวณเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของครีบแบบต่างๆและสรุปรูปแบบการติดตั้งครีบที่ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเพื่อนำไปใช้กับแผง PV/T ต่อไป โดยผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนานและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ

#### 4.1.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนาน

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบท่อนึ่งและแบบแตกตามลำดับ โดยเงื่อนไขที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ ) ในช่องการไหลแบบขนาน ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายตามรูปแบบของครีบได้ดังนี้

กรณีครีบบวม  $90^\circ$  แบบท่อนึ่ง มีบริเวณที่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำที่ด้านหลังของครีบแต่จะเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางระหว่างครีบและจะลดลงอีกครั้งที่บริเวณหน้าครีบตัวถัดไป ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการไหลวนอยู่กับที่ทั้งด้านหน้าและด้านหลังครีบ ในกรณีครีบบวมแตก พบว่ามีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่คล้ายกับครีบบท่อนึ่งแต่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยบริเวณช่องว่างบนครีบเนื่องจากการไหลบางส่วนไหลผ่านช่องว่างนี้

กรณีครีบบวม  $30^\circ$  แบบท่อนึ่ง บริเวณด้านหลังของครีบฝั่งขอบต้นทางการไหลปะทะ (Upstream edge) จะมีการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่มีค่าสูงและขยายตัวตามแนวยาวบริเวณด้านหน้าครีบตัวถัดไปจนลดลงที่ปลายกระแสการไหล (Downstream edge) ซึ่งการกระจายของค่าการถ่ายเทความร้อนนี้เพิ่มสูงขึ้นจากกรณีบวม  $90^\circ$  ค่อนข้างมาก สำหรับครีบบวมแตก พบว่าเกิดบริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงที่ต้นทางการไหลปะทะเช่นเดียวกับครีบบท่อนึ่ง แต่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงจะลดลงอย่างกะทันหันเมื่อผ่านบริเวณช่องว่างบนครีบ

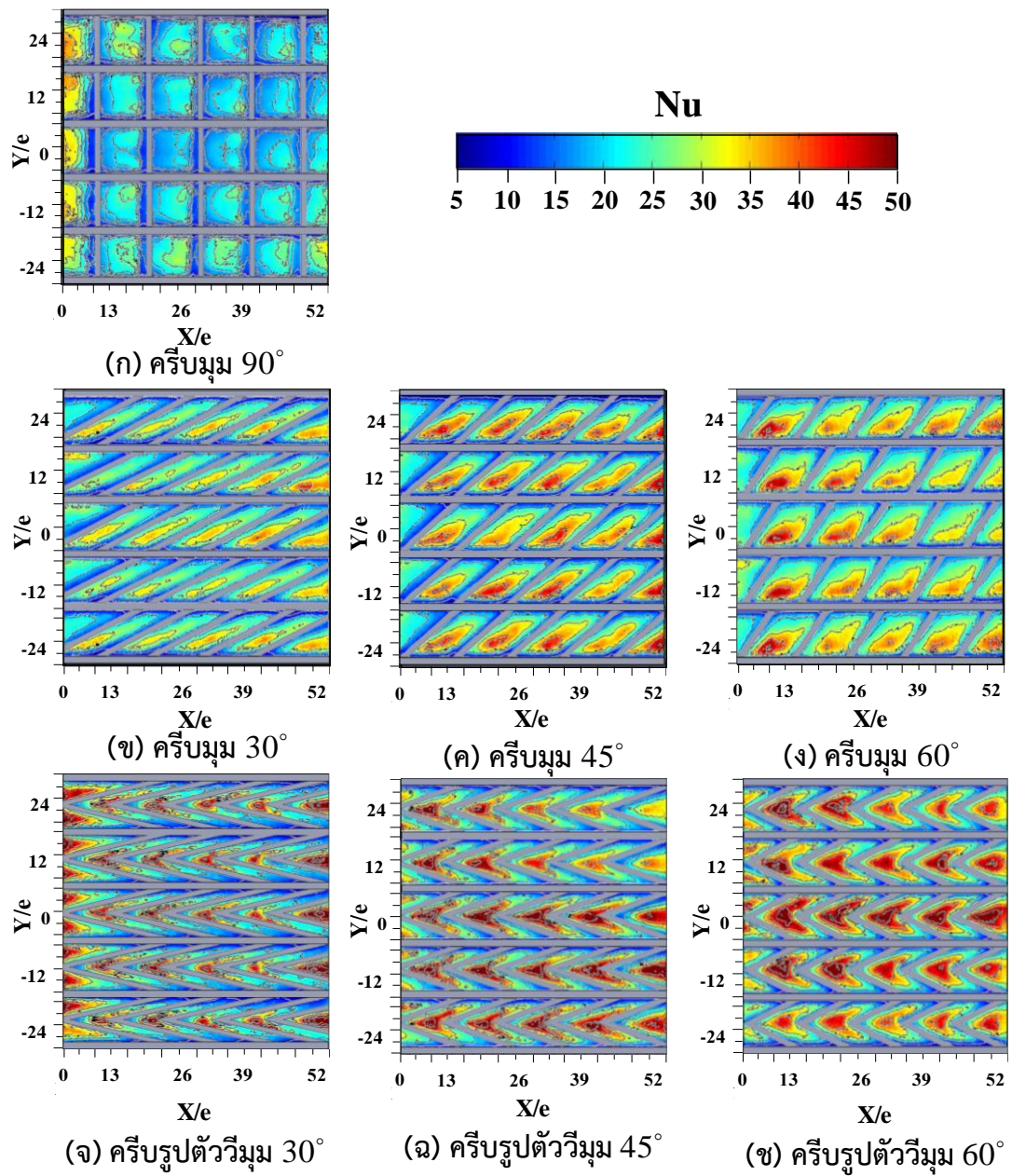
กรณีครีบบวม  $45^\circ$  แบบท่อนึ่ง มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบฝั่งขอบต้นทางการไหลปะทะ (Upstream edge) และพบว่าบริเวณที่เกิดนัสเซิลต์นัมเบอร์สูงนั้นแผ่ขยายตามแนวการไหลบริเวณด้านหน้าของครีบตัวถัดไปมากกว่าครีบบวม  $30^\circ$  ในกรณีครีบบวมแตก พบว่ามีลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เปลี่ยนไปเล็กน้อย คือ จะมีค่าสูงบริเวณด้านหลังของครีบฝั่งขอบต้นทางการไหลปะทะและบริเวณด้านหน้าของช่องว่างบนครีบวนไหลผ่านช่องว่างนี้ แต่โดยรวมแล้วค่านัสเซิลต์นัมเบอร์นั้นลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับครีบบท่อนึ่ง

กรณีครีบบวม  $60^\circ$  ทั้งแบบท่อนึ่งและแบบแตก ลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นมีความคล้ายคลึงกับครีบบวม  $45^\circ$  แต่โดยเฉลี่ยแล้วกรณีครีบบท่อนึ่งนั้นมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากพื้นที่ระหว่างครีบที่มากกว่า

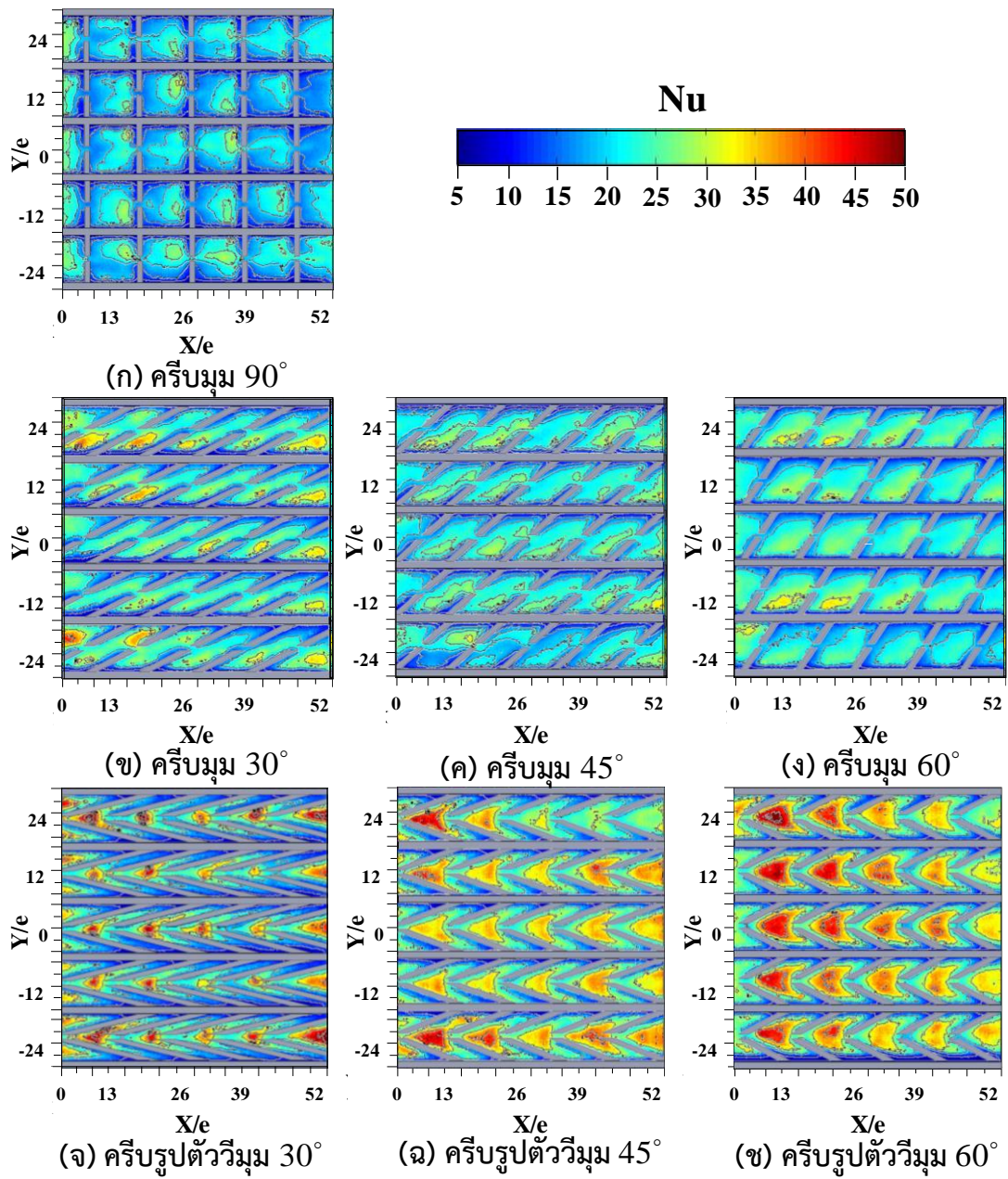
กรณีครีบบวม  $30^\circ$  แบบท่อนึ่ง เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งครีบเพิ่มขึ้น (พื้นที่ใต้ครีบ) ทำให้บริเวณช่องว่างระหว่างครีบนั้นลดลง โดยเกิดค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดที่ด้านหลังของครีบตัวแรกหรือชิดกับด้านหน้ามุมแหลมของครีบตัวถัดไป ในกรณีครีบบวมแตก พบว่าบริเวณที่เกิดค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงนั้นลดลงโดยจะคงเหลือแค่บริเวณด้านหน้าของช่องว่างบนครีบเท่านั้น ทำให้ค่าเฉลี่ยนัสเซิลต์นัมเบอร์ลดลงเช่นเดียวกัน

กรณีครึ่งรูปตัววีมุม  $45^\circ$  แบบต่อเนื่อง พบว่ามีการกระจายของค่านัสเซลล์ต้นมุมเบอร์สูงเพิ่มขึ้นจากครึ่งรูปตัววีมุม  $30^\circ$  เนื่องจากมีพื้นที่ระหว่างครึ่งเพิ่มขึ้น และลักษณะการกระจายของค่านัสเซลล์ต้นมุมเบอร์จะมีค่าสูงบริเวณด้านหน้ามุมแหลมของครึ่งตัวถัดไปและค่อยๆลดลงบริเวณปลายทั้งสองของครึ่งรูปตัววี ในกรณีครึ่งแบบแตก พบว่าจะเกิดบริเวณที่มีค่านัสเซลล์ต้นมุมเบอร์สูงที่บริเวณพื้นผิวตรงกลางระหว่างครึ่งตัวแรกและตัวถัดไปและลดลงอย่างชัดเจนที่ปลายของครึ่งรูปตัววี นอกจากนี้บริเวณภายในช่องว่างบนครึ่งนั้นก็มีค่านัสเซลล์ต้นมุมเบอร์ที่ต่ำเช่นกัน

กรณีครึ่งรูปตัววีมุม  $60^\circ$  ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแตกนั้นมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่คล้ายกับครึ่งรูปตัววีมุม  $45^\circ$  แต่โดยรวมแล้วมีค่าสูงกว่าเนื่องจากพื้นที่ระหว่างครึ่งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบ  
 ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )



รูปที่ 4.2 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบ  
 ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )



#### 4.1.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายตามรูปแบบของครีบได้ดังนี้

กรณีครีบบวม  $90^\circ$  แบบต่อเนื่อง มีการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงบริเวณตรงกลางระหว่างครีบตัวแรกกับตัวถัดไปแต่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละช่องการไหล และนอกจากนั้นในบริเวณส่วนวกกลับพบการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์ที่มีค่าสูงเช่นกัน เนื่องจากการไหลปะทะในส่วนวกกลับสามารถทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนรุนแรงขึ้นได้ แต่สำหรับกรณีครีบบวมแบบแตกรูป พบว่าค่าสเกลต์นัมเบอร์ลดลงทุกบริเวณ

กรณีครีบบวม  $30^\circ$  แบบต่อเนื่อง พบว่าค่าสเกลต์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบฝั่งต้นทางการไหลปะทะ (Upstream edge) ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในช่องการไหลแบบขนาน แต่บริเวณส่วนวกกลับมีการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเป็นบริเวณกว้าง ในกรณีครีบบวมแบบแตก พบว่าบริเวณด้านหลังครีบฝั่งต้นทางการไหลมีค่าสเกลต์นัมเบอร์ที่ลดลงอย่างชัดเจนแต่ยังคงมีบริเวณของค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงในส่วนของการวกกลับ

กรณีครีบบวม  $45^\circ$  และมุม  $60^\circ$  แบบต่อเนื่อง บริเวณส่วนวกกลับมีค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีครีบบวม  $30^\circ$  และบริเวณพื้นที่ระหว่างครีบมีการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงและมีความซับซ้อนมากขึ้นแต่โดยรวมแล้วค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงกว่าครีบบวม  $30^\circ$  เช่นกัน สำหรับกรณีครีบบวมแบบแตก มีลักษณะการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อเทียบกับครีบบวมต่อเนื่องแต่โดยภาพรวมแล้วมีค่าลดลง

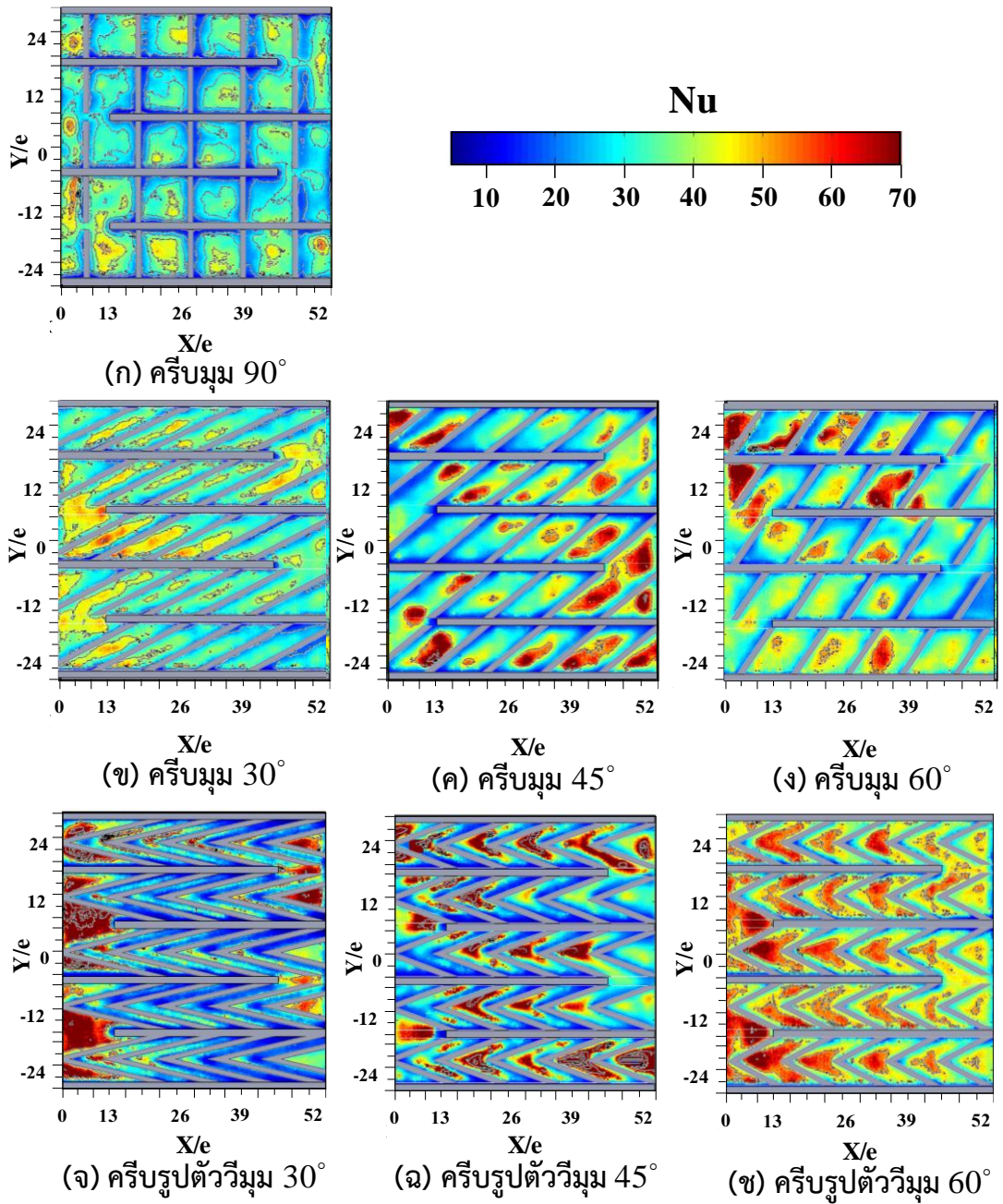
กรณีครีบบวมรูปตัววีมุม  $30^\circ$  แบบต่อเนื่อง บริเวณด้านหลังครีบมีค่าสเกลต์นัมเบอร์ต่ำอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับครีบบวมเอียงมุม  $30^\circ$  ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่ระหว่างครีบลดลง แต่ในบริเวณส่วนวกกลับจะมีค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงอย่างเห็นได้ชัด แต่กรณีครีบบวมแบบแตก พบว่าค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงบริเวณส่วนวกกลับนั้นลดลงเมื่อเทียบกับครีบบวมต่อเนื่อง แต่เกิดบริเวณที่มีค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงใกล้ช่องว่างบนครีบแทน

กรณีครีบบวมรูปตัววีมุม  $45^\circ$  แบบต่อเนื่อง บริเวณด้านหลังของครีบตัวแรกหรือด้านมุมแหลมของครีบตัวถัดไปมีการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์ที่มีค่าสูง แต่ในส่วนวกกลับนั้นค่าลดลงเมื่อเทียบกับครีบบวมรูปตัววีมุม  $30^\circ$  สำหรับกรณีครีบบวมแบบแตก มีลักษณะการกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์ใกล้เคียงกับครีบบวมต่อเนื่องแต่โดยภาพรวมแล้วมีค่าลดลง

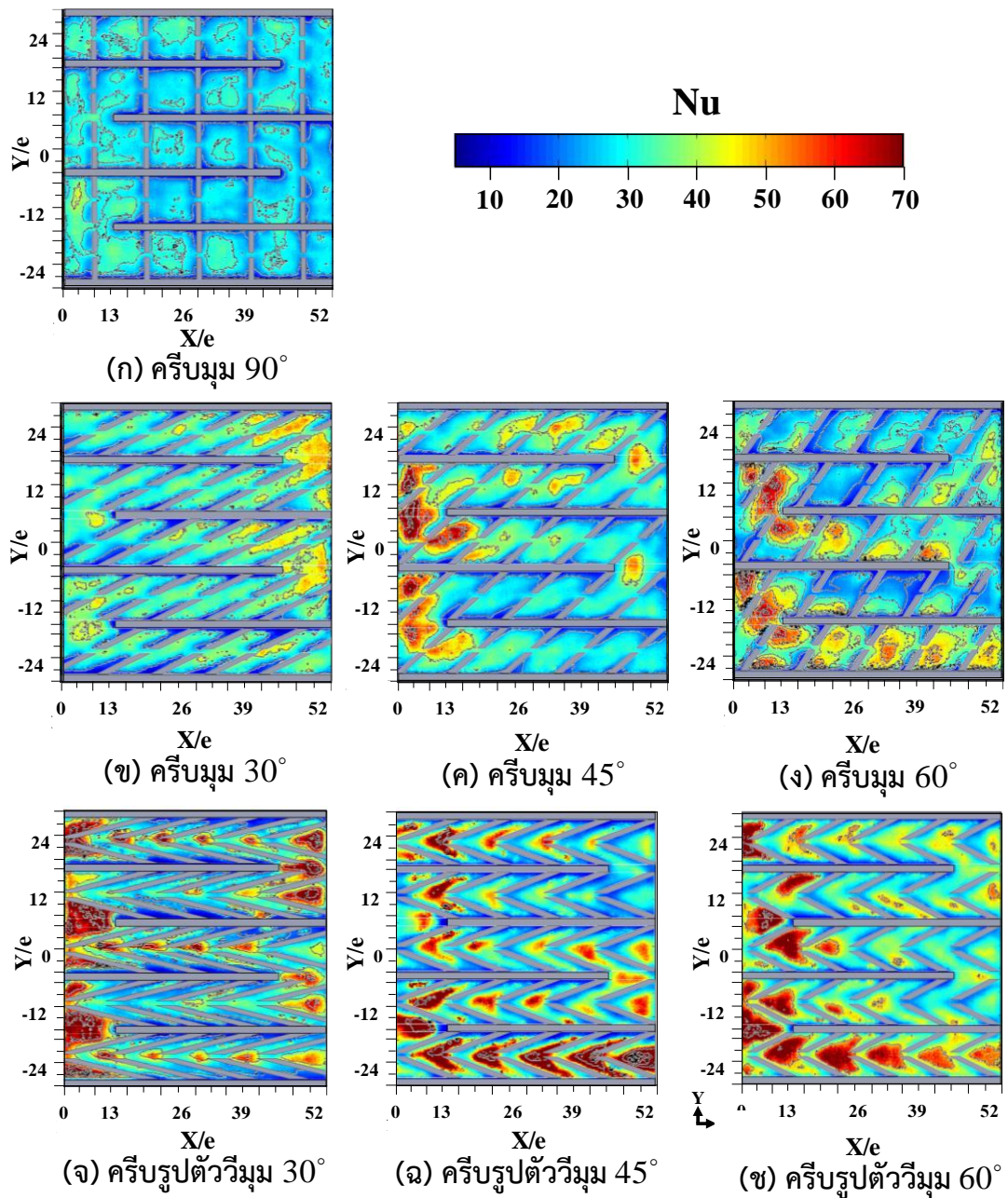
กรณีครีบบวมรูปตัววีมุม  $60^\circ$  แบบต่อเนื่อง การกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์ที่มีค่าสูงนั้นสม่ำเสมอกว่าครีบบวมรูปตัววีมุม  $45^\circ$  และในบริเวณส่วนวกกลับก็มีค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงเช่นกัน สำหรับ

กรณีครีบบแบบแตก มีลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์คล้ายกับครีบบต่อเนื่องแต่มีค่าลดลงอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 หากเปรียบเทียบการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ระหว่างช่องการไหลแบบขนานและช่องการไหลแบบวกกลับที่ติดครีบบรูปแบบเดียวกันในช่องการไหลจะพบว่าช่องการไหลแบบขนานมีการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่สม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่ แตกต่างกับช่องการไหลแบบวกกลับที่การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์มีความซับซ้อน แต่ช่องการไหลแบบวกกลับนั้นให้ค่าเฉลี่ยนัสเซิลต์นัมเบอร์ตลอดทั้งพื้นที่ที่สูงกว่า เป็นผลมาจากส่วนวกกลับซึ่งเมื่อการไหลของน้ำวกกลับนั้นจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงขึ้นและนอกจากนั้นช่องการไหลแบบวกกลับจะมีพื้นที่หน้าตัดขาเข้าช่องการไหลเพียง 1 ช่อง หรือ 1 ใน 5 ส่วนของช่องการไหลแบบขนาน ส่งผลให้ความเร็วของน้ำในช่องการไหลแบบวกกลับสูงกว่าช่องการไหลแบบขนาน 5 เท่า ซึ่งก็คือเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ของช่องการไหลแบบวกกลับสูงกว่าช่องการไหลแบบขนาน 5 เท่า เช่นกัน



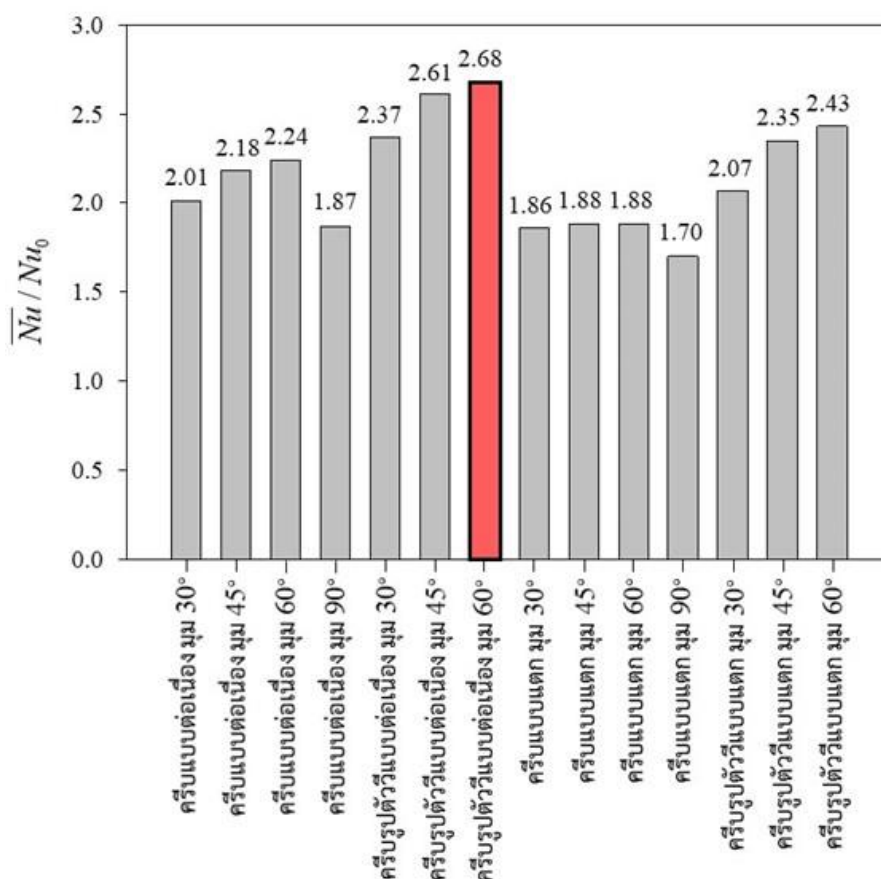
รูปที่ 4.3 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบวม  
 ในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบวมต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )



รูปที่ 4.4 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบรูปร่างตัววีมุมในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบรูปร่างตัววีมุมที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

#### 4.1.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน

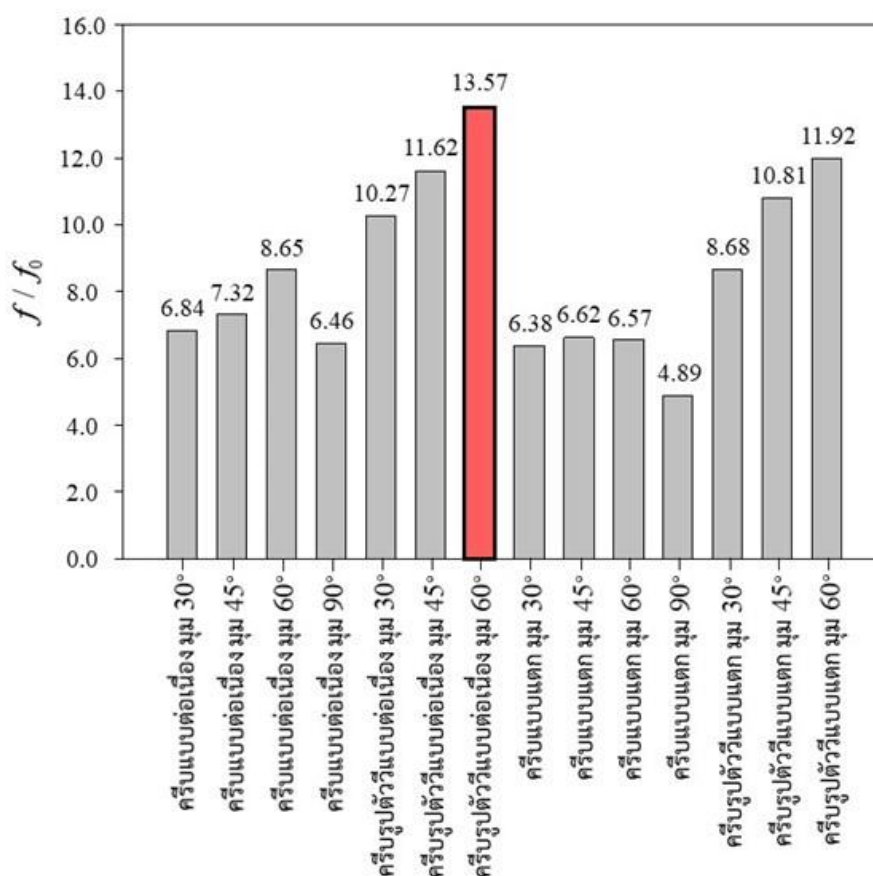
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนานเทียบกับพื้นผิวเรียบ ( $\overline{Nu} / Nu_0$ ) ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ ) พบว่า การติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนานให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบบนช่องการไหลแบบตั้งฉากและเอียงทำมุมกับการไหลภายในเงื่อนไขมุมครีบบนช่องการไหลเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าการติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบตั้งฉากโดยส่วนใหญ่จะมีค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ต่ำกว่าครีบบนช่องการไหลแบบเอียงทำมุมครีบบนช่องการไหลเท่ากัน โดยในการทดลองนี้ครีบบนช่องการไหลแบบเอียงทำมุม 60°, 45° และ 30° ให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ 2.68, 2.61 และ 2.37 ตามลำดับ ขณะที่การติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบตั้งฉากมุม 90° นั้นให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 1.70 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีพื้นผิวเรียบ (Smooth wall)



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )

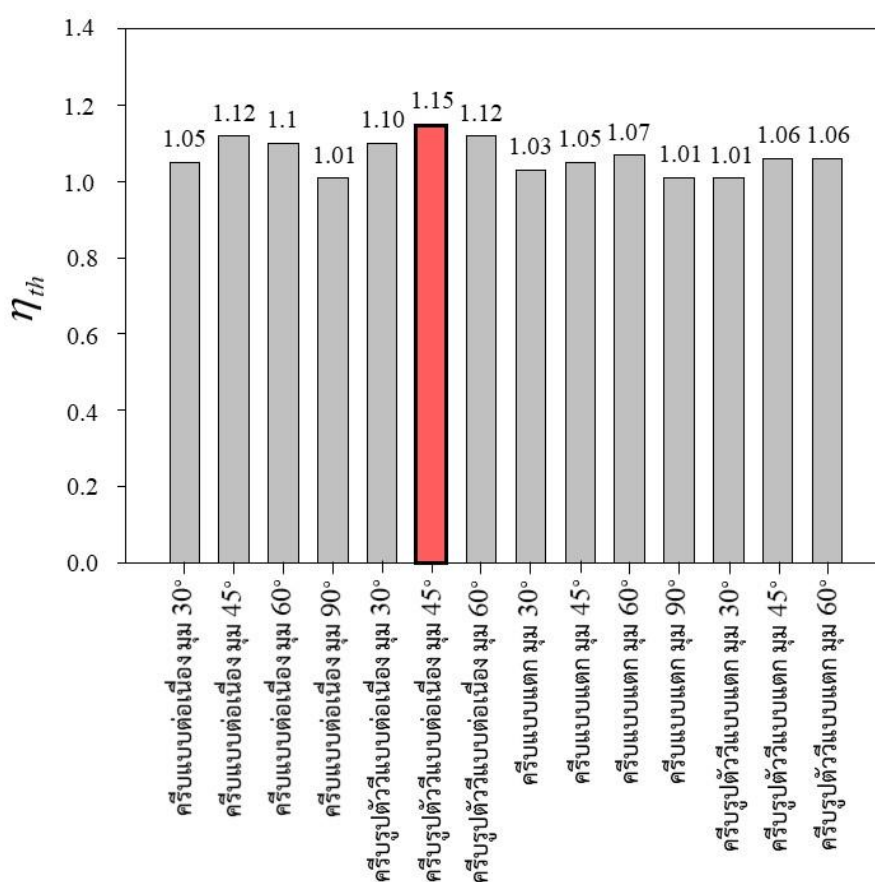


รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบริบบแบบต่างๆเทียบกับกรณีพื้นผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 400$ ) พบว่า การติดตั้งกลุ่มครีบริบบตัววินั้นให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดเมื่อเทียบกับครีบริบบแบบอื่นๆที่มีมุมเท่ากัน โดยครีบริบบตัววินีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดเท่ากับ 13.57 เท่าเมื่อเทียบกับพื้นผิวเรียบ รองลงมา คือ ครีบริบบตัววินีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  ซึ่งมีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเท่ากับ 11.62 และ 10.27 เท่าตามลำดับ ขณะที่การติดตั้งครีบริบบแบบแตกมุม  $90^\circ$  มีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเท่ากับ 4.89 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดจากการทดลอง



รูปที่ 4.6 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบริบบสร้างความปั่นป่วนในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )

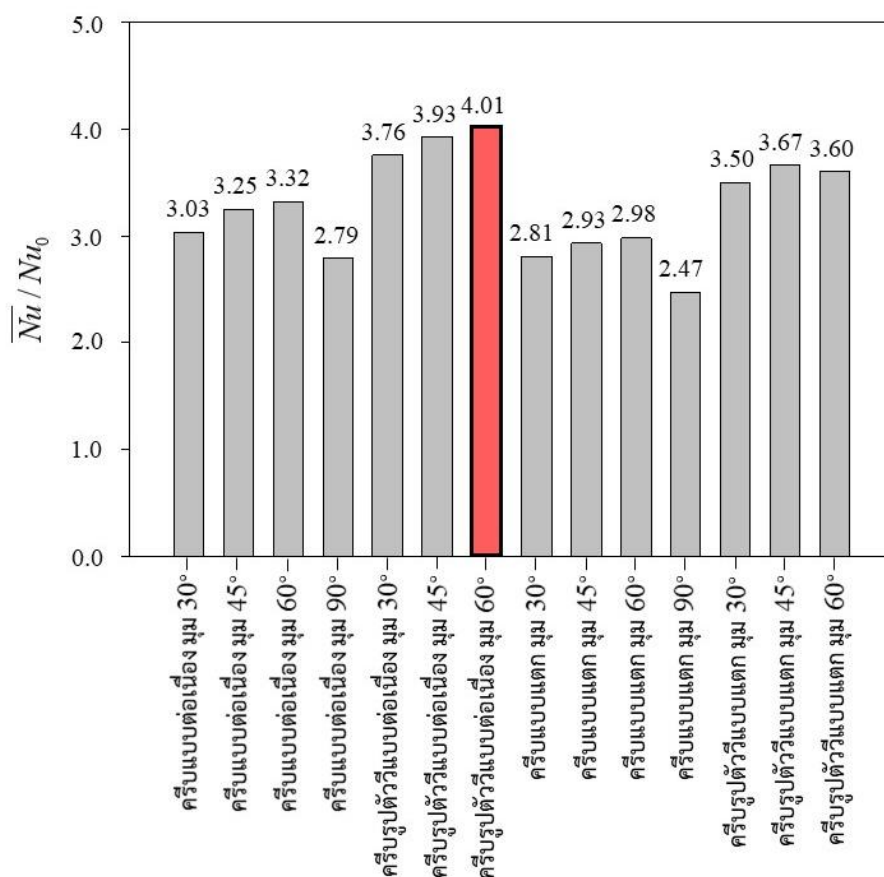
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบบูแบบต่างๆในช่องการไหลแบบขนาน ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ ) ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการติดตั้งครีบบูทั้ง 14 รูปแบบในช่องการไหลแบบขนานนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยครีบบูตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.15 เท่า เนื่องจากมีอัตราส่วนนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยใกล้เคียงกับครีบบูตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  แต่มีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ต่ำกว่าค่อนข้างชัดเจน



รูปที่ 4.7 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบู  
ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )

#### 4.1.4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับ

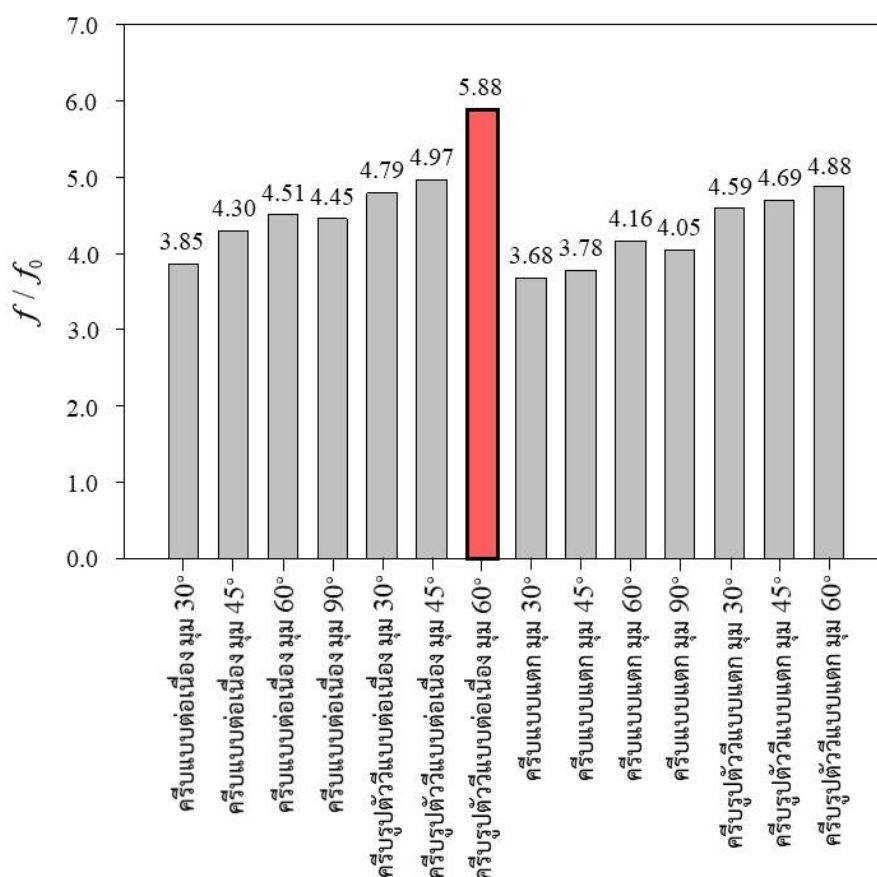
รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับเทียบกับพื้นผิวเรียบ ( $\overline{Nu} / Nu_0$ ) ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) ภายใต้รูปแบบการติดตั้งครีบบนผนังแตกต่างกัน พบว่า กลุ่มครีบบนรูปตัววีให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงที่สุดเมื่อเทียบกับครีบบนแบบตั้งฉากและครีบบนแบบเอียงทำมุมกับการไหลในมุมของครีบบนที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งครีบบนแบบต่อเนื่องให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าครีบบนแบบแตกในรูปแบบและมุมของครีบบนเดียวกัน โดยครีบบนรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  เป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงที่สุด คือ 4.01, 3.93 และ 3.76 เท่าตามลำดับ ขณะที่การติดตั้งครีบบนแบบแตกมุม  $90^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับพื้นผิวเรียบ (Smooth wall) ที่ไม่ได้ติดตั้งครีบบนและช่องการไหลใดๆ



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

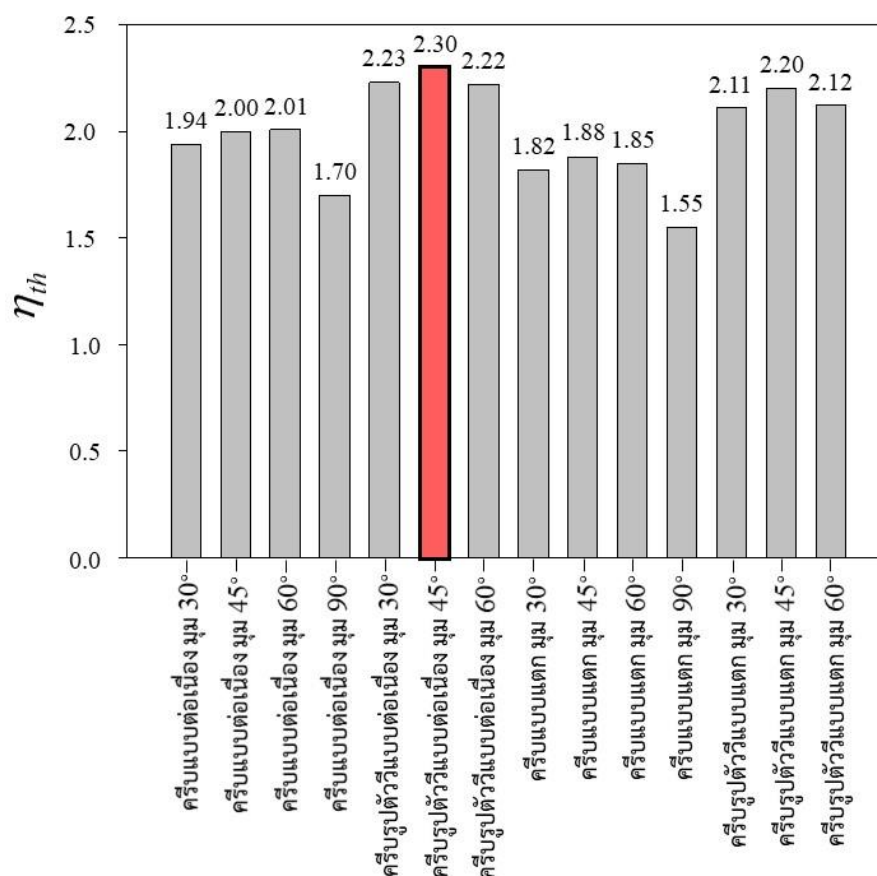


รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลแบบวงกลับที่ติดตั้งครีบบูแบบต่างๆเทียบกับกรณีพื้นผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) พบว่า กลุ่มครีบบูรูปตัววีให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดเมื่อเทียบกับรูปแบบครีบบูกลุ่มอื่นๆ ที่มุมของครีบบูเท่ากัน โดยครีบบูรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดคิดเป็น 5.88 เท่าของพื้นผิวเรียบและรองลงมาคือครีบบูรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  คิดเป็น 4.97 และ 4.79 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบบูสร้างความปั่นป่วนในช่องการไหลแบบวงกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบริบบแบบต่างๆในช่องการไหลแบบวงกลับ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการติดตั้งครีบริบบทั้ง 14 รูปแบบในช่องการไหลแบบวงกลับนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยครีบริบบตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากการทดสอบเท่ากับ 2.30 เท่าเมื่อเทียบกับพื้นผิวเรียบ ซึ่งสูงกว่าครีบริบบตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  เนื่องจากมีอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยใกล้เคียงกันแต่มีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.10 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบริบ

ในช่องการไหลแบบวงกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

สำหรับผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบริบทั้งในช่องการไหลแบบขนานและแบบวงกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 8 และ 12 LPM นั้น มีลักษณะที่เหมือนกันกับเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM โดยได้แสดงผลนี้ไว้ในส่วนของภาคผนวก ก และสำหรับการสรุปผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบริบดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.1.5 สรุปผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบ

จากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบโดยใช้กล่องอินฟราเรดบันทึกผลการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนแล้วนำภาพการกระจายของอุณหภูมินั้นมาแปลงเป็นการกระจายของค่านี้สเซลต์นัมเบอร์ โดยมีตัวแปรควบคุมดังนี้ ค่าพลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ  $300 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนทดสอบและอุณหภูมิห้องทดลองเท่ากับ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และอัตราการไหลน้ำที่ 4, 8 และ 12 LPM พบว่า

(1) การติดตั้งกลุ่มครีบบรูปตัววี จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายที่สูงกว่าครีบบกลุ่มอื่นๆ โดยการติดตั้งครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^{\circ}$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการติดตั้งครีบบรูปแบบอื่นๆในช่องการไหลลักษณะเดียวกัน

(2) การติดตั้งครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^{\circ}$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในทุกๆเงื่อนไขการทดสอบ เนื่องจากมีอัตราส่วนนี้สเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยใกล้เคียงกับครีบบแบบต่อเนื่องรูปตัววีมุม  $60^{\circ}$  แต่มีค่าตัวประกอบความเสียหายที่ต่ำกว่าค่อนข้างมาก

(3) กรณีครีบบแบบต่อเนื่องจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีครีบบแบบแตก ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลผ่านช่องว่างบนครีบบนั้นรบกวนการไหลปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังครีบบทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง

(4) การติดตั้งครีบบในช่องการไหลแบบขนานมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอกว่าช่องการไหลแบบวกกลับ แต่ขณะเดียวกันช่องการไหลแบบวกกลับจะมีค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เนื่องจากผลของการไหลปะทะในส่วนวกกลับทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหลที่รุนแรงขึ้นและผลของหน้าตัดทางเข้าช่องการไหลแบบวกกลับที่มีพื้นที่เพียง 1 ใน 5 ส่วนของช่องการไหลแบบขนานทำให้ความเร็วของของไหลในช่องการไหลแบบวกกลับสูงกว่าช่องการไหลแบบขนานถึง 5 เท่า ( $Re$  ของช่องการไหลแบบวกกลับสูงกว่า 5 เท่า) ซึ่งส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น

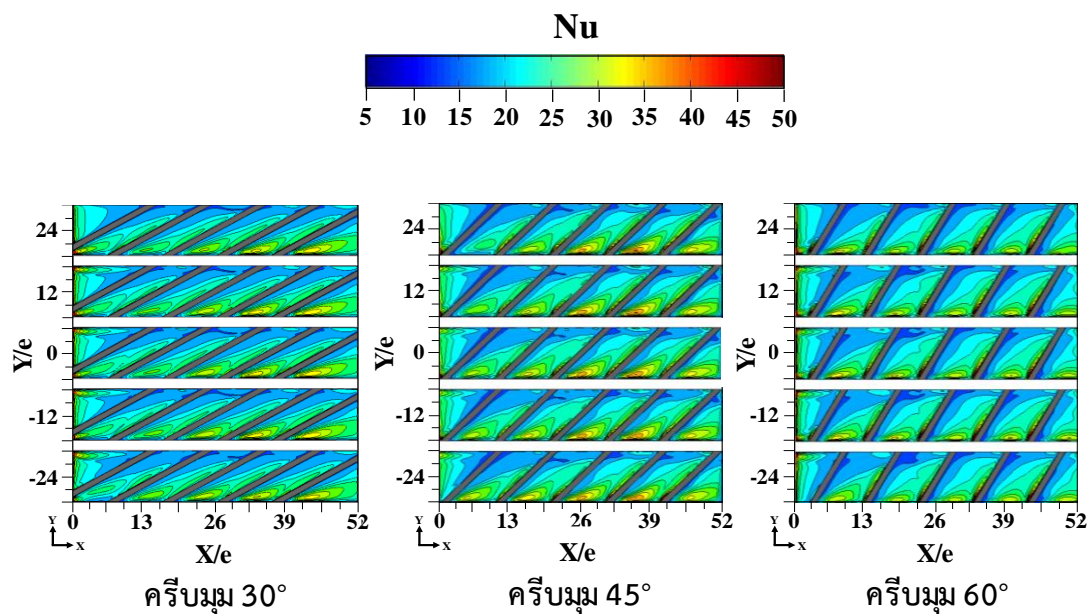
ดังนั้น การติดตั้งครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^{\circ}$  และช่องการไหลแบบวกกลับ ซึ่งให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากการทดลองนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งในโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ต่อไป ถัดไปเป็นการแสดงผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดตั้งครีบบสร้างความปั่นป่วน ซึ่งได้ทำการจำลองในโปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ให้มีเงื่อนไขเหมือนกับการทดลองในส่วนแรกโดยผลของการศึกษาจะแสดงในหัวข้อที่ 4.2

## 4.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ

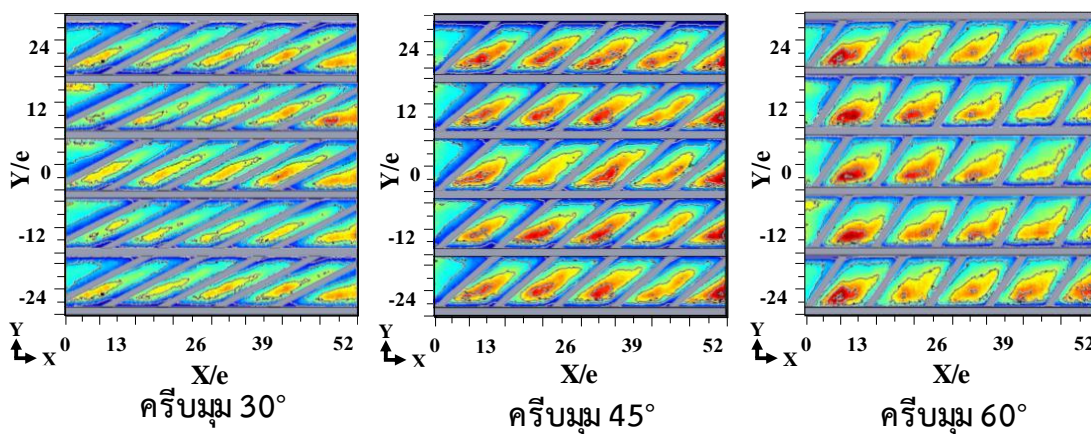
จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2 การศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ ซึ่งใช้วิธีการจำลองการไหลของน้ำผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบเพื่อสร้างความปั่นป่วนในช่องการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมกับการทดลอง และใช้พฤติกรรมการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นในการจำลองอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบแต่ละรูปแบบ โดยผลการจำลองการไหลนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะของช่องการไหล (เช่นเดียวกับการทดลอง) คือ ผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบขนาน และผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบวกกลับ

### 4.2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนระหว่างการจำลองการไหลกับการทดลอง

รูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบโดย รูปที่ 4.11 (ก) แสดงผลการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมและรูปที่ 4.11 (ข) แสดงผลการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบที่ได้จากการทดลองในกรณีนี้ติดตั้งครีบบุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  จากรูปพบว่าผลการจำลองการไหลกับการทดลองนั้นให้ลักษณะการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์ที่ใกล้เคียงกันเพียงแต่ผลจากการทดลองให้ค่านัสเซลล์ต์นมเบอร์ที่ต่ำกว่า ซึ่งสืบเนื่องจากข้อจำกัดด้านความแม่นยำในการทำนายการไหลใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน Shear Stress Transport (SST) k- $\omega$  model



(ก) การจำลองการไหล



(ข) การทดลอง

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบระหว่างการจำลองการไหลกับการทดลอง

#### 4.2.2 ผลการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนาน

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบท่เนื่องและแบบแตกตามลำดับ โดยเงื่อนไขการจำลองที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ ) ในช่องการไหลแบบขนาน ซึ่งผลการจำลองสามารถอธิบายตามรูปแบบของครีบบท่ดังนี้

กรณีครีบบท่มุม  $90^\circ$  แบบท่เนื่อง มีบริเวณที่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำด้านหลังของครีบบท่ ซึ่งเกิดจากการไหลวนที่อยู่กับที่ด้านหลังครีบบท่แต่ละตัว แต่กรณีครีบบท่แบบแตก มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยที่ด้านหน้าและด้านหลังของช่องบนครีบบท่ซึ่งเกิดจากการไหลบางส่วนไหลผ่านช่องว่างบนครีบบท่

กรณีครีบบท่มุม  $30^\circ$  แบบท่เนื่องให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นด้านหลังของครีบบท่ฝั่งขอบด้านต้นทางการไหล (Upstream edge) และพบบริเวณที่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงขยายเต็มแนวยาวบริเวณด้านหน้าของครีบบท่ตัวถัดไป กรณีครีบบท่แบบแตก พบว่าบริเวณด้านหลังช่องบนครีบบท่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากการไหลผ่านช่องบนครีบบท่ แต่โดยรวมแล้วค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดต่ำลงกว่ากรณีครีบบท่แบบท่เนื่อง

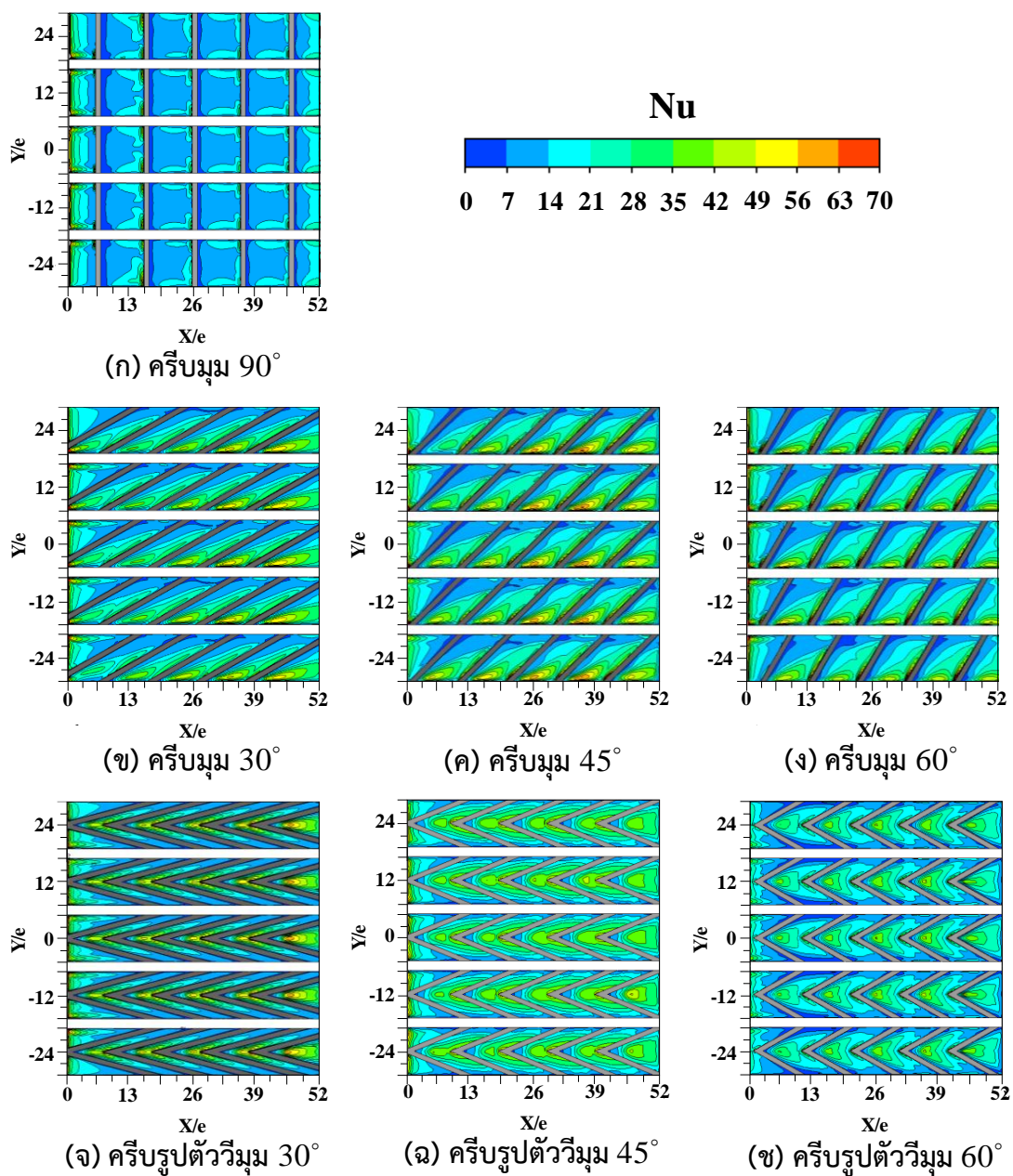
กรณีครีบบท่มุม  $45^\circ$  แบบท่เนื่อง ให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ด้านหลังครีบบท่ฝั่งของต้นทางการไหลสูงขึ้นกว่ากรณีของครีบบท่มุม  $30^\circ$  และพบว่าการเพิ่มของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณด้านหน้าของครีบบท่ตัวถัดไป ในกรณีครีบบท่แบบแตก พบว่าลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เปลี่ยนไปเล็กน้อยเนื่องจากการไหลบางส่วนไหลผ่านช่องว่างบนครีบบท่ แต่โดยรวมค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดลงเมื่อเทียบกับครีบบท่แบบท่เนื่อง

กรณีครีบบท่มุม  $60^\circ$  มีลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เหมือนกับกรณีของครีบบท่มุม  $45^\circ$  แต่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ต่ำกว่าทั้งกรณีครีบบท่แบบท่เนื่องและกรณีครีบบท่แบบแตก

กรณีครีบบท่รูปตัววีมุม  $30^\circ$  แบบท่เนื่อง เนื่องจากพื้นที่ใต้ครีบบท่เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ช่องว่างระหว่างครีบบท่ลดลง เกิดค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดที่ด้านหลังของครีบบท่หรือบริเวณด้านหน้าของครีบบท่ตัวถัดไป ในกรณีครีบบท่แบบแตกพบว่ามีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดลงและบนพื้นผิวมีนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่สม่ำเสมอขึ้นกว่ากรณีของครีบบท่แบบท่เนื่องเนื่องจากการไหลผ่านช่องว่างบนครีบบท่

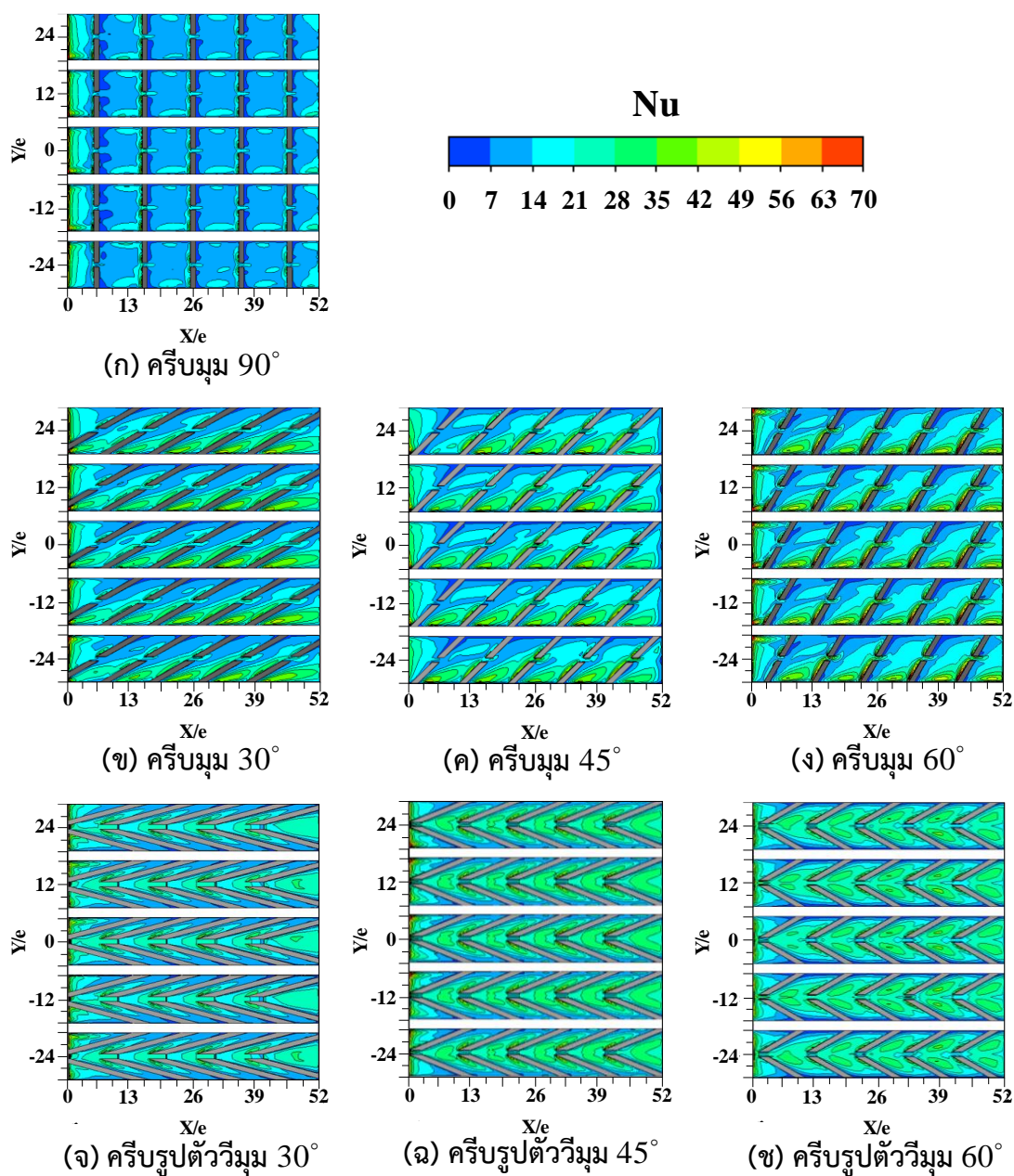
กรณีครีบบท่รูปตัววีมุม  $45^\circ$  แบบท่เนื่อง พบว่ามีพื้นที่ช่องว่างระหว่างครีบบท่เพิ่มขึ้น ค่าการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ระหว่างครีบบท่มีความสม่ำเสมอกว่ากรณีครีบบท่รูปตัววีมุม  $30^\circ$  กรณีครีบบท่แบบแตก พบว่าลักษณะการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เกิดบริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงที่ด้านหน้าของช่องบนครีบบท่และค่านัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับครีบบท่แบบท่เนื่อง ในกรณีครีบบท่รูปตัววีมุม  $60^\circ$  ด้านหลังของครีบบท่แบบท่เนื่องเกิดบริเวณที่มี

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดด้านหลังของมุมตัววี และกรณีของครีบบแบบแตก เกิดบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณด้านหลังของครีบบตัววี ซึ่งเป็นผลจากการไหลผ่านช่องบนครีบบ



รูปที่ 4.12 ผลการจำลอง การกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )





รูปที่ 4.13 ผลการจำลอง การกระจายของค่านี้สเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )

สำหรับการอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะใช้ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่ไหลผ่านครีบบในช่องการไหลแบบขนานในการวิเคราะห์ผล ซึ่งพฤติกรรมการไหลนี้จะแสดงในรูปของการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วบนหน้าตัดในช่องการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.3



### 4.2.3 ผลการจำลองลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบบนสร้างความเป็นป่วน

รูปที่ 4.14 ถึง รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ  $Y-Z$  ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ  $X'/e=3, 6, 9$  ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีที่ติดตั้งครีบบนแบบต่างๆ โดยในแต่ละรูปด้านซ้ายมือแสดงผลของกรณีครีบบนต่อเนื่องและด้านขวามือแสดงผลกรณีครีบบนแบบแตก

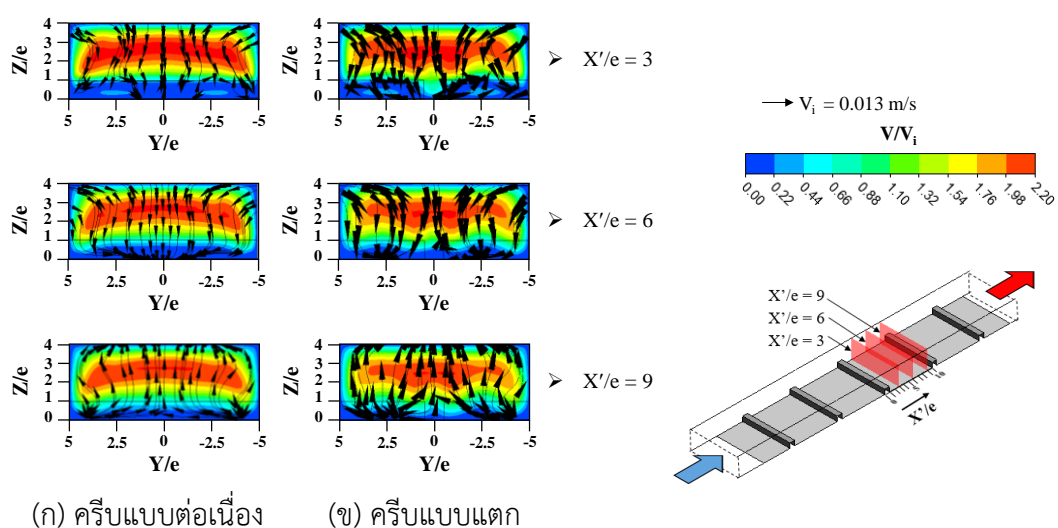
สำหรับครีบบน  $90^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.14 กรณีครีบบนต่อเนื่องพบว่าบริเวณใกล้กับพื้นผิวที่ติดครีบ ( $Z/e=0$  ถึง  $1$ ) จะมีความเร็วที่ต่ำ โดยที่หน้าตัด  $X'/e=3$  การไหลมีทิศทางไหลเข้าสู่ผิวที่ติดครีบตลอดหน้าตัดการไหล บนระนาบ  $X'/e=6$  เนื่องจากการไหลในทิศทางเข้าสู่ผิวที่ติดครีบ ทำให้บริเวณการไหลที่มีความเร็วต่ำใกล้กับผิวติดครีบลดลง และบนหน้าตัด  $X'/e=9$  ที่ตำแหน่งด้านหน้าของครีบที่อยู่ถัดไปการไหลมีทิศทางไหลออกจากผิวที่ติดครีบตลอดหน้าตัด อย่างไรก็ตาม บริเวณที่ใกล้กับผิวติดครีบการไหลยังคงมีความเร็วต่ำ ซึ่งการไหลบริเวณที่มีความเร็วต่ำใกล้กับผิวที่ติดครีบส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำ กรณีครีบบนแบบแตกพบว่าการไหลผ่านช่องบนครีบทำให้เกิดบริเวณที่การไหลมีความเร็วสูงบนพื้นผิวในระนาบที่  $X'/e=3$  ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านหลังช่องการไหลบนครีบบนเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระนาบ  $X'/e=6$  และ  $X'/e=9$  บริเวณที่มีความเร็วเพิ่มสูงขึ้นหายไป

สำหรับครีบบน  $30^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.15 กรณีครีบบนต่อเนื่องหน้าตัดในแต่ละระนาบเกิดการไหลอันดับที่ 2 (Secondary flow) หมุนวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาส่งผลให้บริเวณการไหลที่มีความเร็วสูงเหนือครีบถูกการไหลวนนี้เหนี่ยวนำ ให้ปะทะพื้นผิวที่ขอบครีบบนด้านต้นทางที่การไหลไหลปะทะหรือในบริเวณ  $Y/e=2.5$  ถึง  $5$  ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้บริเวณการไหลใกล้กับพื้นผิวที่ติดครีบ เกิดก้อนการไหลวนขนาดเล็กกระหว่างครีบบนช่องการไหล (ที่  $Y/e=-5$ ) ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนด้านหน้าของครีบตัวถัดไปเพิ่มสูงขึ้น กรณีครีบบนแบบแตกพบว่าการไหลวนในหน้าตัดมีความซับซ้อนขึ้นเนื่องจากการไหลผ่านช่องการไหลบนครีบบนกววนการไหลที่ถูกเหนี่ยวนำโดยการไหลวนทำให้การไหลปะทะพื้นผิวมีความรุนแรงลดลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงกว่ากรณีของครีบบนต่อเนื่อง

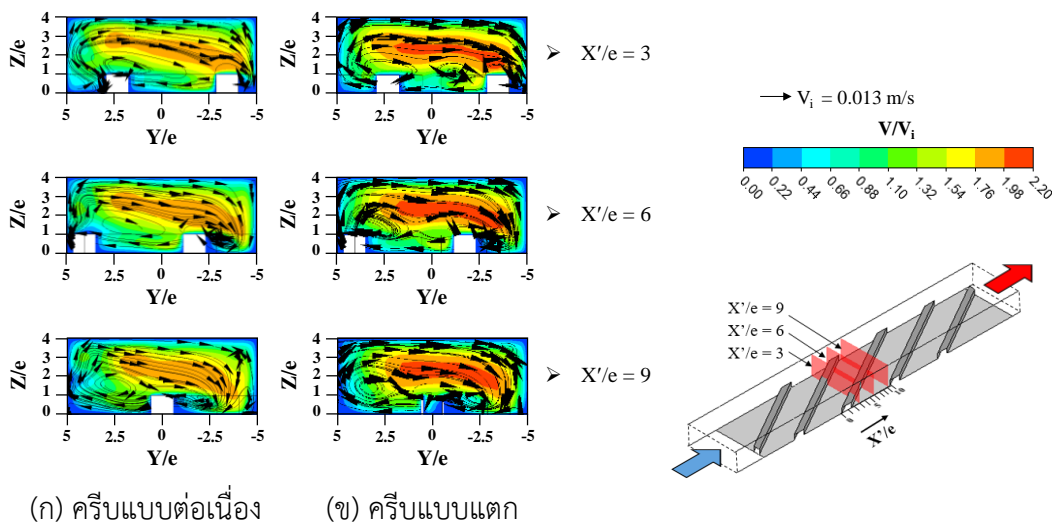
สำหรับครีบบน  $45^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.16 กรณีครีบบนต่อเนื่องนอกจากเกิดการไหลวนขนาดใหญ่ในหน้าตัดแล้วยังเกิดการไหลวนขนาดเล็กความเร็วต่ำใกล้กับบริเวณผนังด้านข้างช่องการไหล ( $Y/e=-5$ ) ส่งผลให้การไหลความเร็วสูงที่อยู่เหนือครีบบนถูกเหนี่ยวนำให้ไหลปะทะพื้นผิวรุนแรงขึ้น ( $Y/e=2.5$  ถึง  $5$ ) และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีของครีบบน  $30^\circ$  และในกรณีครีบบนแบบแตก การไหลที่ปะทะพื้นผิวมีความรุนแรงลดลงจากการถูกรบกวนโดยช่องบนครีบทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนลดลงกว่ากรณีครีบบนต่อเนื่อง ในขณะที่กรณีครีบบน  $60^\circ$  การไหลในระนาบมีลักษณะใกล้เคียงการไหลของครีบบน  $45^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.17

สำหรับครีบบรูปตัววีมุม  $30^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.18 กรณีครีบบแบบต่อเนื่องเกิดคู่การไหลวนที่ไหลสวนทางกัน เหนี่ยวนำให้การไหลที่มีความเร็วสูงเหนือครีบบไหลปะทะกับพื้นผิวตรงกลางช่องการไหล ( $Y/e=0$ ) ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณกลางช่องการไหลระหว่างครีบบเพิ่มสูงขึ้น และกรณีครีบบแบบแตก การไหลผ่านช่องบนครีบบรบกวนการไหลที่ถูกเหนี่ยวนำให้ปะทะพื้นผิวทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง

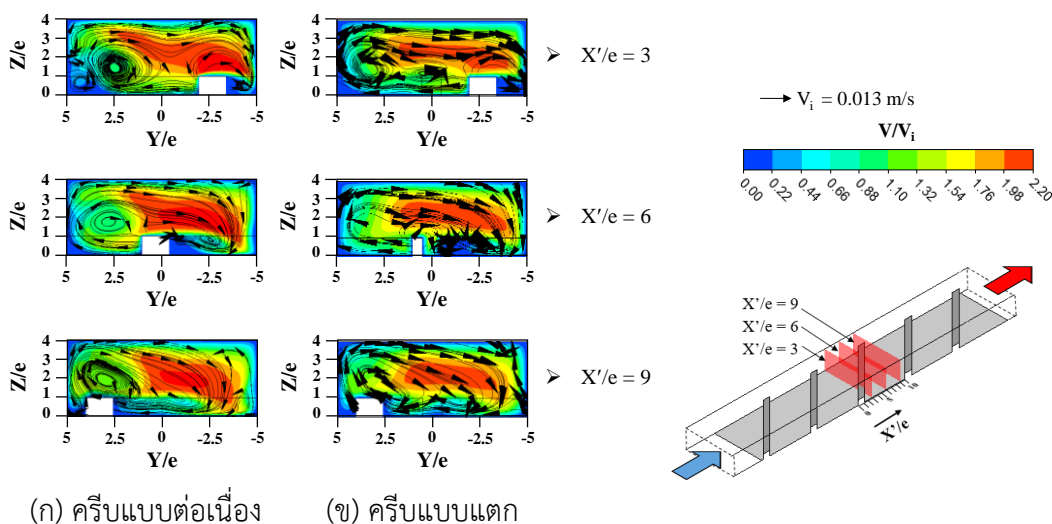
สำหรับครีบบรูปตัววีมุม  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  การไหลที่มีความเร็วสูงถูกเหนี่ยวนำด้วยคู่การไหลวนปะทะพื้นผิวเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น กรณีครีบบแบบแตก ความเร็วการไหลที่ถูกเหนี่ยวนำให้ปะทะพื้นผิวลดลงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20



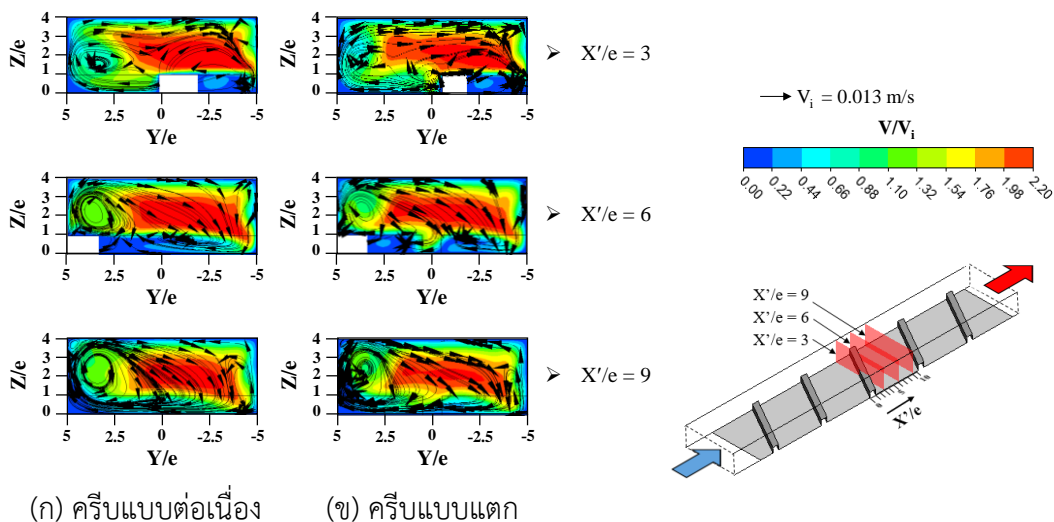
รูปที่ 4.14 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบมุม  $90^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบบ  $X'/e = 3, 6$  และ  $9$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )



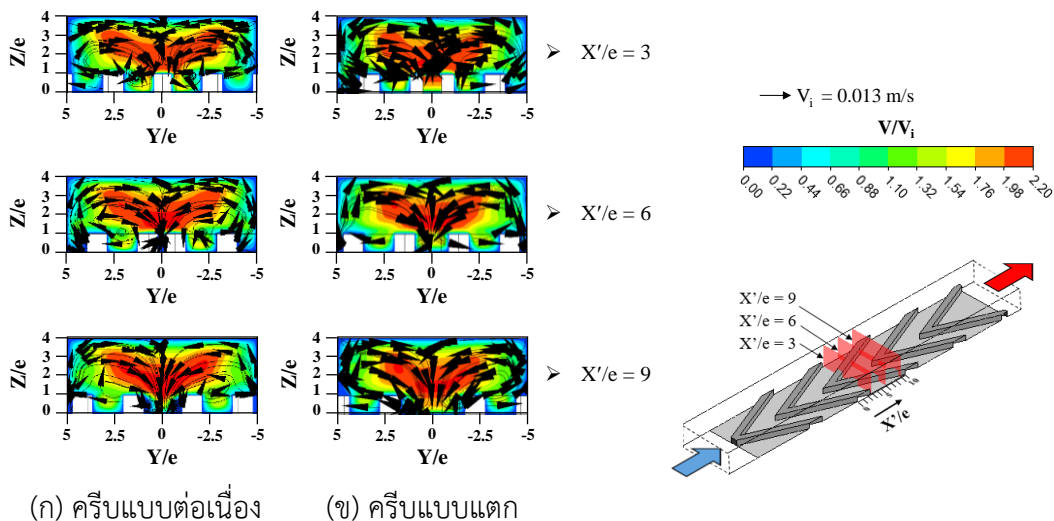
รูปที่ 4.15 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนมุม 30° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ  $X'/e = 3, 6$  และ  $9$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )



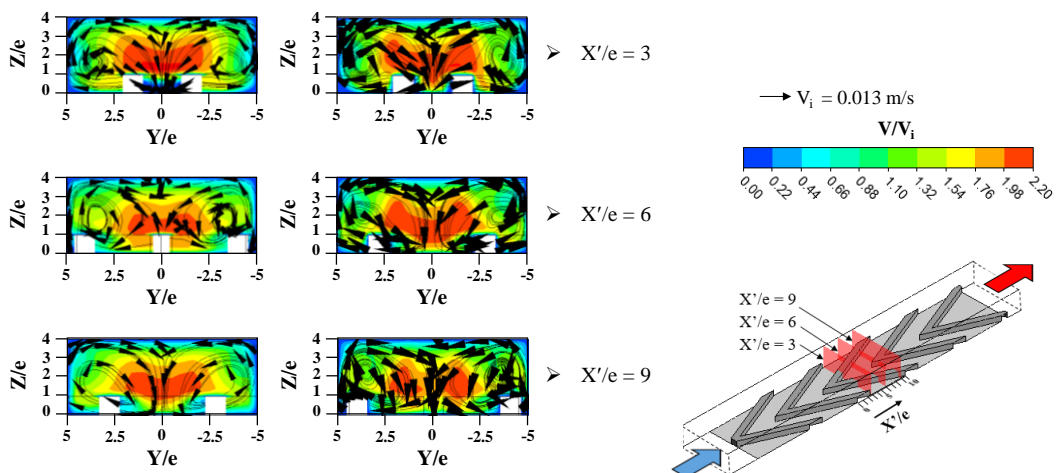
รูปที่ 4.16 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนมุม 45° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ  $X'/e = 3, 6$  และ  $9$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ )



รูปที่ 4.17 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนมุม  $60^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ  $X'/e = 3, 6$  และ  $9$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ  $4$  LPM ( $Re = 400$ )

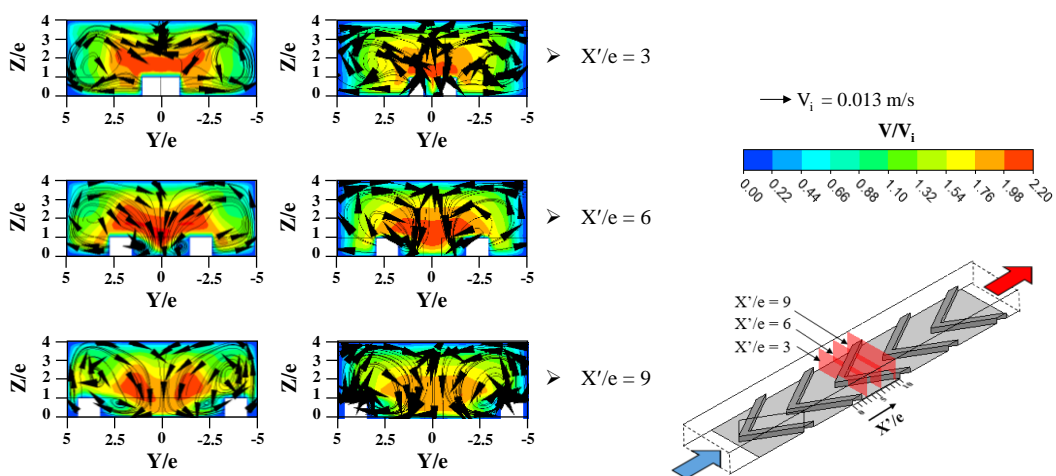


รูปที่ 4.18 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนมุม  $30^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบ  $X'/e = 3, 6$  และ  $9$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ  $4$  LPM ( $Re = 400$ )



(ก) ครีบบนต่อเนื่อง (ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.19 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนตัวมีมุม 45° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบบน X'/e = 3, 6 และ 9 ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM (Re = 400)



(ก) ครีบบนต่อเนื่อง (ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.20 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนตัวมีมุม 60° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งด้านหลังครีบบน X'/e = 3, 6 และ 9 ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM (Re = 400)

#### 4.2.4 ผลการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ

รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบท่อนึ่งและแบบแตกตามลำดับ โดยเงื่อนไขการจำลองที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) ในช่องการไหลแบบวกกลับ ซึ่งโดยภาพรวมแล้วการกระจายของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์บนพื้นผิวก่อนข้างที่จะไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับกรณีช่องการไหลแบบขนาน ผลการจำลองของครีบบท่อนึ่งและแบบแตกสามารถอธิบายได้ดังนี้

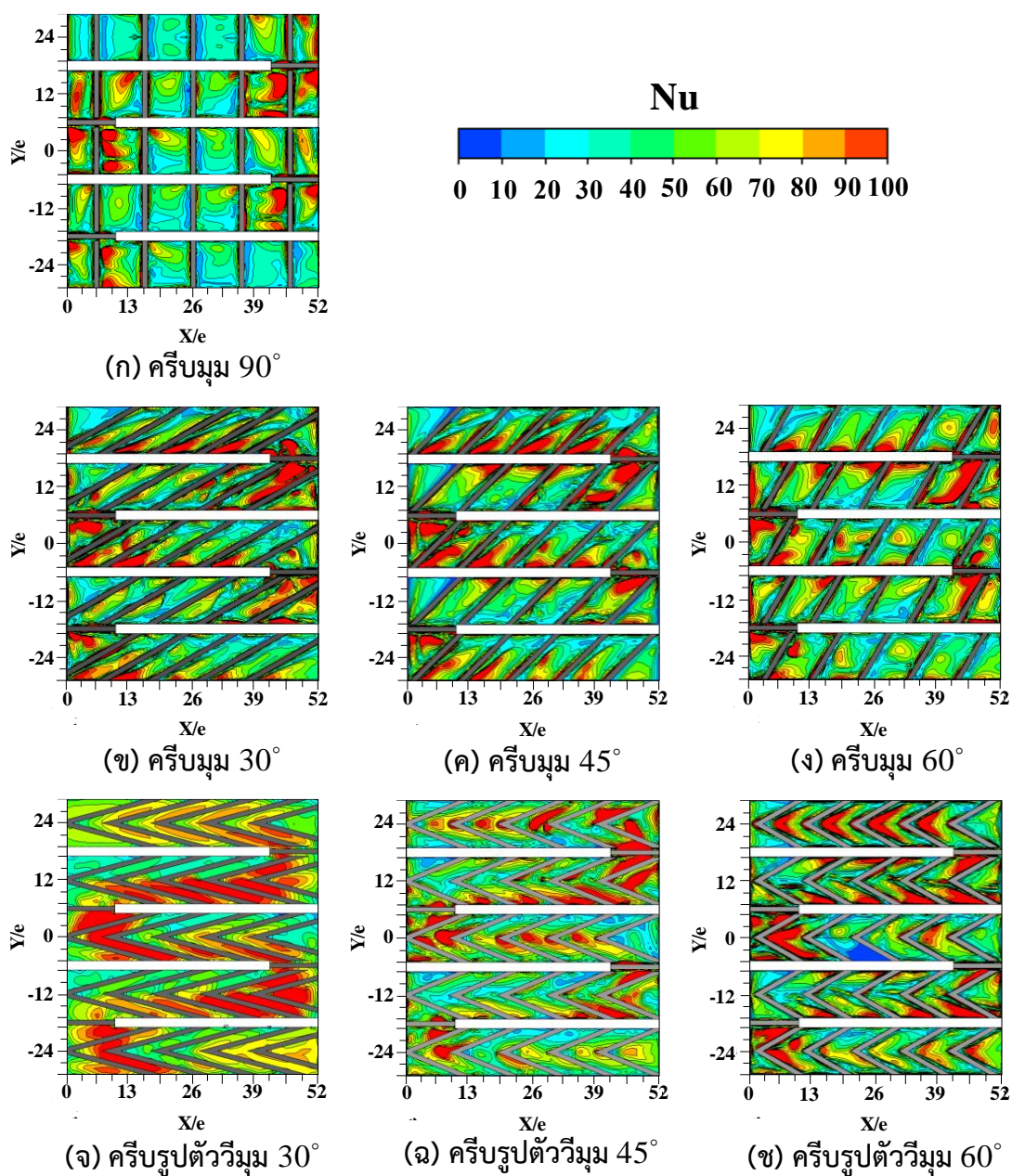
สำหรับครีบบวม  $90^\circ$  แบบท่อนึ่ง พบว่าการกระจายของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณการไหลแบบวกกลับ เนื่องจากการไหลปะทะกับผนังและเกิดการไหลวนอันดับที่สองเกิดขึ้นในขณะการไหลวกกลับ แต่กรณีครีบบวมแตกพบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์ลดลงทุกบริเวณ

สำหรับครีบบวม  $30^\circ$  แบบท่อนึ่ง ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์เพิ่มสูงขึ้นด้านหลังของครีบบวมฝั่งต้นทางที่การไหลไหลปะทะ มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีในช่องการไหลแบบขนาน แต่ในบริเวณการไหลแบบวกกลับพบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์มีค่าสูงขึ้นและการกระจายมีรูปแบบที่ซับซ้อน ในกรณีของครีบบวมแตก พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์มีลักษณะการกระจายที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยและมีการเพิ่มของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์ในบริเวณด้านหลังของช่องบนครีบบวม อย่างไรก็ตามบริเวณที่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์สูงเกิดขึ้นเหมือนกับกรณีของครีบบวมท่อนึ่ง

สำหรับครีบบวม  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  แบบท่อนึ่ง พบว่าที่บริเวณด้านหลังครีบบวมมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็นบริเวณกว้างกว่ากรณีครีบบวม  $30^\circ$  และมีลักษณะการกระจายค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์ที่ซับซ้อนน้อยกว่ากรณีครีบบวม  $30^\circ$  และในกรณีครีบบวมแตก ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับครีบบวมท่อนึ่ง

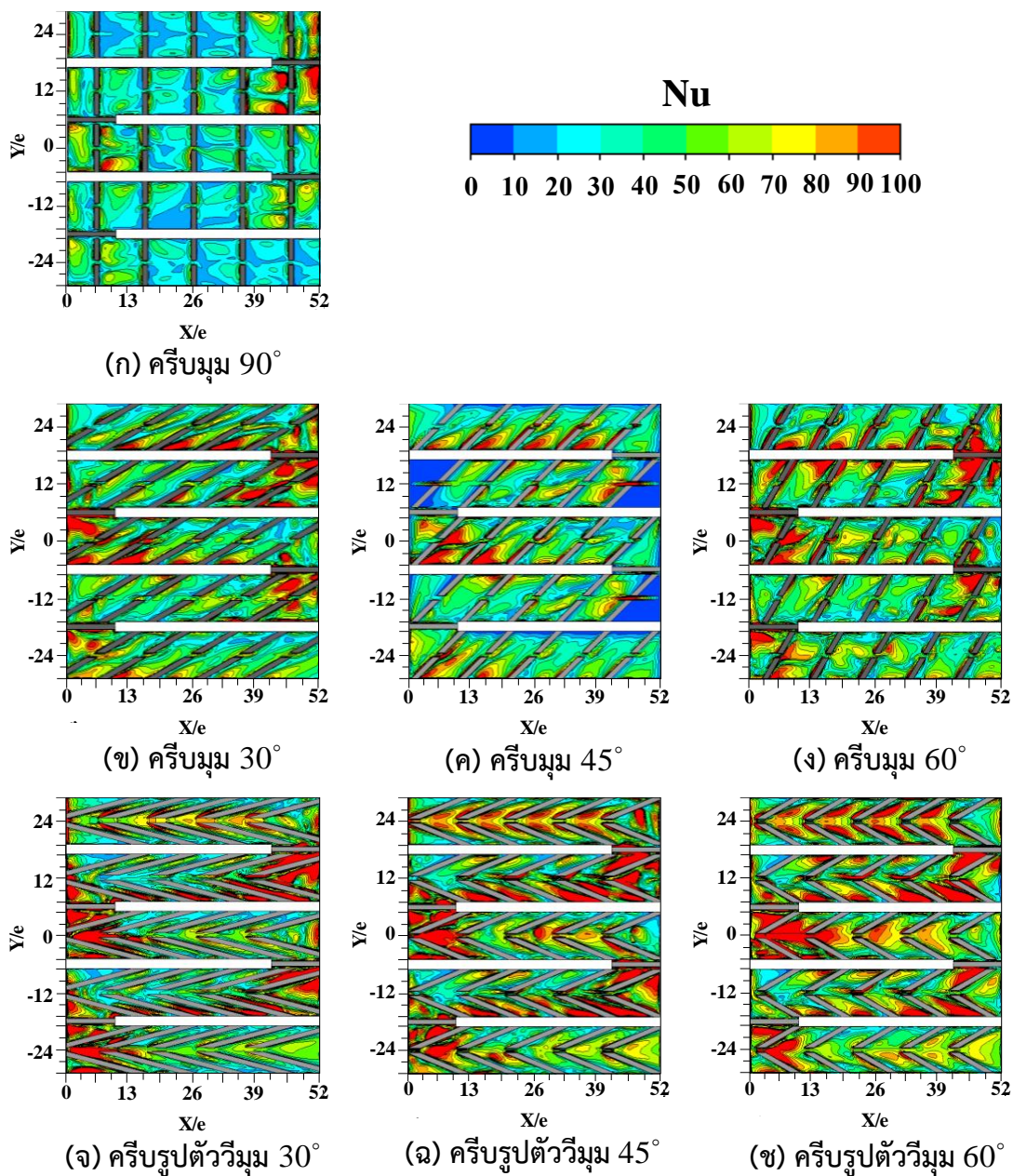
สำหรับครีบบวมรูปตัววี  $30^\circ$  แบบท่อนึ่ง พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็นบริเวณกว้างกว่ากรณีครีบบวมท่อนึ่ง แต่กรณีของครีบบวมแตก บริเวณที่ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์สูงลดลงอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับครีบบวมรูปตัววี  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  แบบท่อนึ่ง พบว่าบริเวณที่ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์สูงลดลงเมื่อเทียบกับกรณีครีบบวมรูปตัววี  $30^\circ$  แต่กรณีของครีบบวมแตกกลับพบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเบอร์สูงขึ้นเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับครีบบวมท่อนึ่ง



รูปที่ 4.21 ผลการจำลอง การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )





รูปที่ 4.22 ผลการจำลอง การกระจายของค่านี้สเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบวมในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบวมแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

สำหรับการอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะใช้ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่ไหลผ่านครีบบวมในช่องการไหลแบบวกกลับในการวิเคราะห์ผล ซึ่งพฤติกรรมของการไหลนี้จะแสดงในรูปของการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วบนหน้าตัดในช่องการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.5



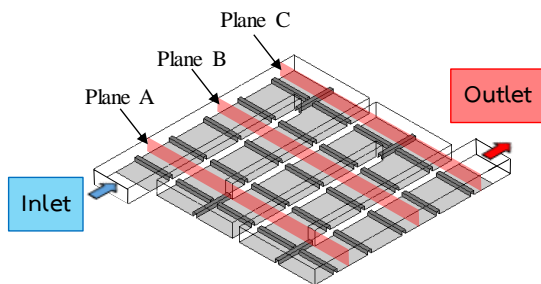
#### 4.2.5 ผลการจำลองลักษณะการไหลในช่องการไหลแบบวงกลับที่ติดตั้ง crib สร้างความปั่นป่วน

รูปที่ 4.23 แสดงโมเดลและระนาบที่ใช้ศึกษาการกระจายและเวกเตอร์ความเร็วในช่องการไหลแบบวงกลับที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) รูปที่ 4.24 ถึง รูปที่ 4.30 แสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B และ C ในช่องการไหลแบบวงกลับ สำหรับการแสดงผลการกระจายความเร็วบนหน้าตัดช่องการไหลกรณีติดตั้ง crib แบบต่างๆ (ก) จะแสดงผลของกรณี crib แบบต่อเนื่องและ (ข) จะแสดงผลของกรณี crib แบบแตก ซึ่งโดยภาพรวมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนการไหลผ่าน crib ในช่องการไหลแบบขนานพบว่า ลักษณะการไหลมีความซับซ้อนมากเนื่องจากการไหลแบบวงกลับทำให้เกิดการไหลอันดับที่สองและเมื่อไหลผ่าน crib ทำให้การไหลมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างการไหลวนหรือการไหลที่มีความเร็วสูงใกล้กับผิวที่ติด crib จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น

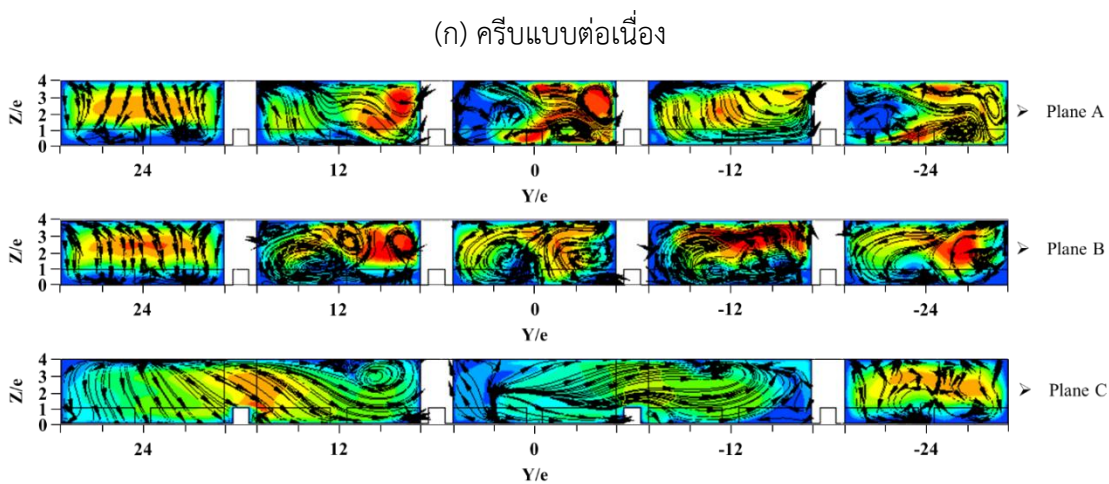
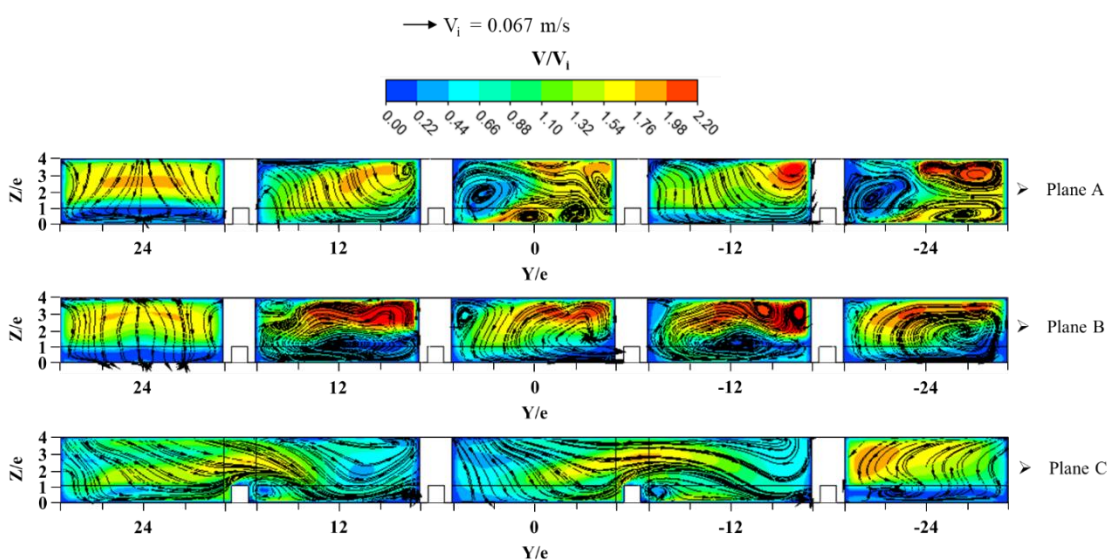
สำหรับ crib มุม  $90^\circ$  แบบต่อเนื่อง การไหลวงกลับทำให้เกิดโครงสร้างการไหลวนในช่องการไหลเป็นจำนวนมากส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในบริเวณการไหลวงกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับกรณี crib แบบแตก ส่งผลให้เกิดการไหลผ่านช่องว่างบน crib ทำให้ความเร็วใกล้กับพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี crib แบบต่อเนื่อง

สำหรับกรณี crib มุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  แบบต่อเนื่อง ก่อนการไหลวงกลับการไหลอันดับสองในแต่ละหน้าตัดเหนี่ยวนำให้บริเวณที่ความเร็วสูงเหนือ crib ไหลปะทะพื้นผิวส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น บริเวณ crib เอียงด้านต้นทางที่การไหลไหลปะทะ แต่บริเวณการไหลวงกลับเกิดโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อนขึ้น ทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนซับซ้อน ในกรณี crib แบบแตก พบว่าเกิดโครงสร้างการไหลวนในหน้าตัดการไหลเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะบริเวณการไหลวงกลับส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนแตกต่างจากกรณีของ crib แบบต่อเนื่อง

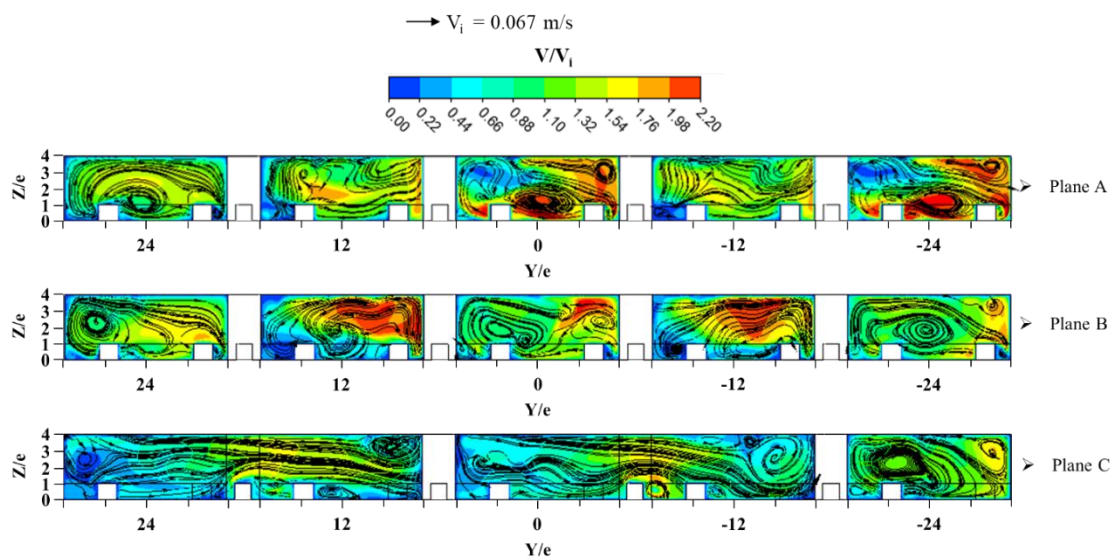
crib รูปตัววี มุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  กรณี crib แบบต่อเนื่อง ก่อนการไหลวงกลับเกิดคู่การไหลวนสวนทางกันในระนาบ แต่หลังจากการไหลวงกลับคู่การไหลวนถูกทำลายเหลือเพียงการไหลวนเดี่ยวที่รุนแรงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น กรณี crib แบบแตก พบว่าความเร็วในช่องการไหลเพิ่มสูงขึ้นตลอดทั้งระนาบโดยเฉพาะกรณี crib รูปตัววี มุม  $45^\circ$  สำหรับกรณีมุม  $60^\circ$  คู่การไหลวนจะหมุนวนรุนแรงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของ crib แบบต่อเนื่อง



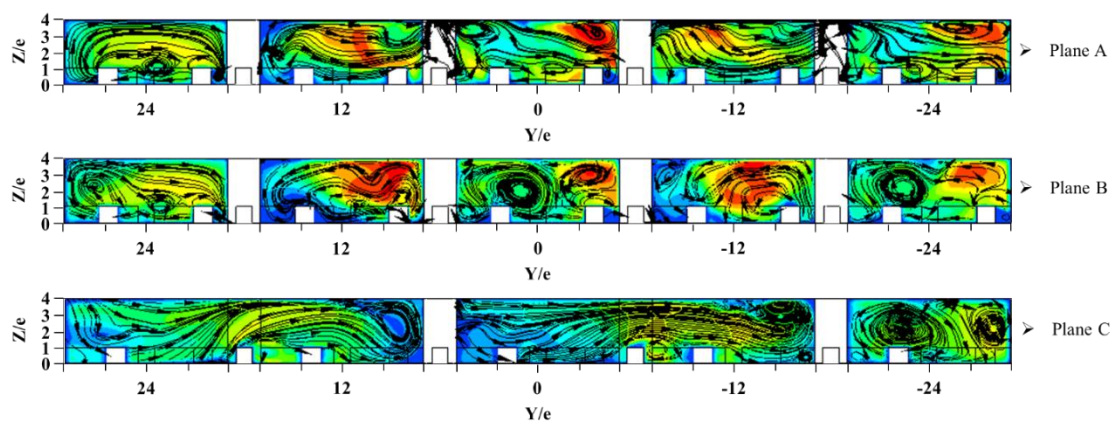
รูปที่ 4.23 โมเดลและระนาบที่ใช้แสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็ว  
ในช่องการไหลแบบวกกลับ



รูปที่ 4.24 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบน  $90^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่ง  
ระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23)  
ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

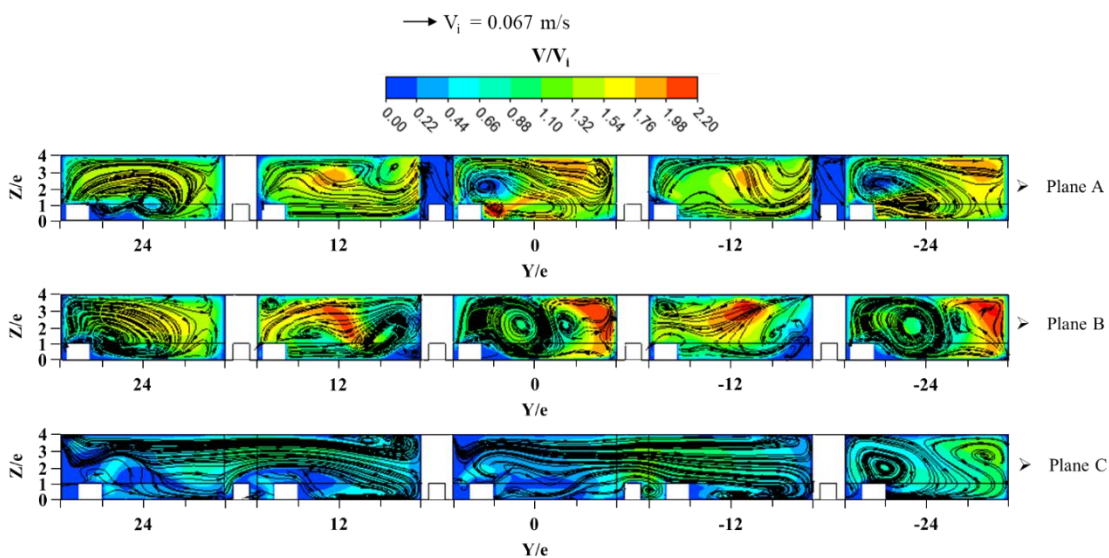


(ก) ครีบบนต่อเนื่อง

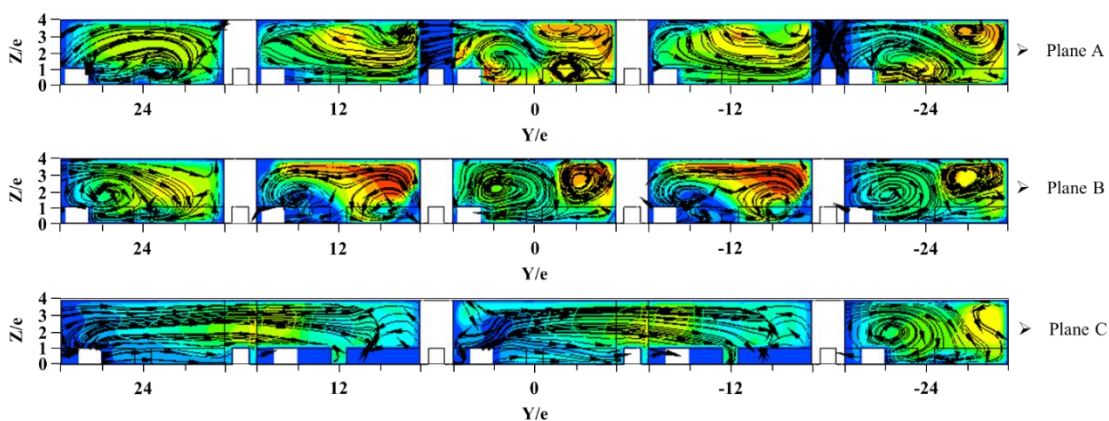


(ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.25 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบวม  $30^\circ$   
 บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23)  
 ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )



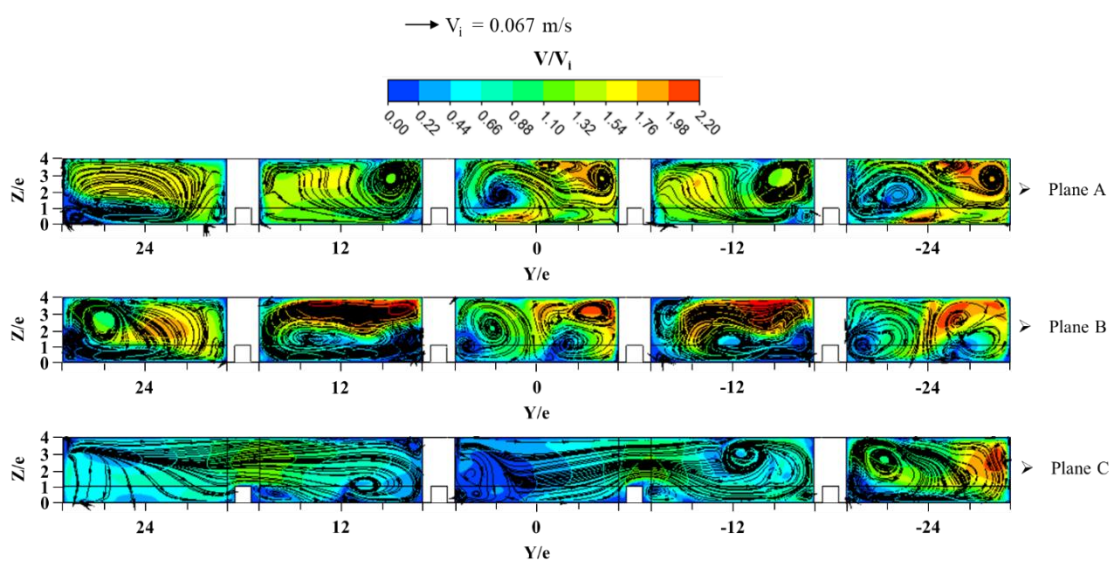
(ก) ครีบบนต่อเนื่อง



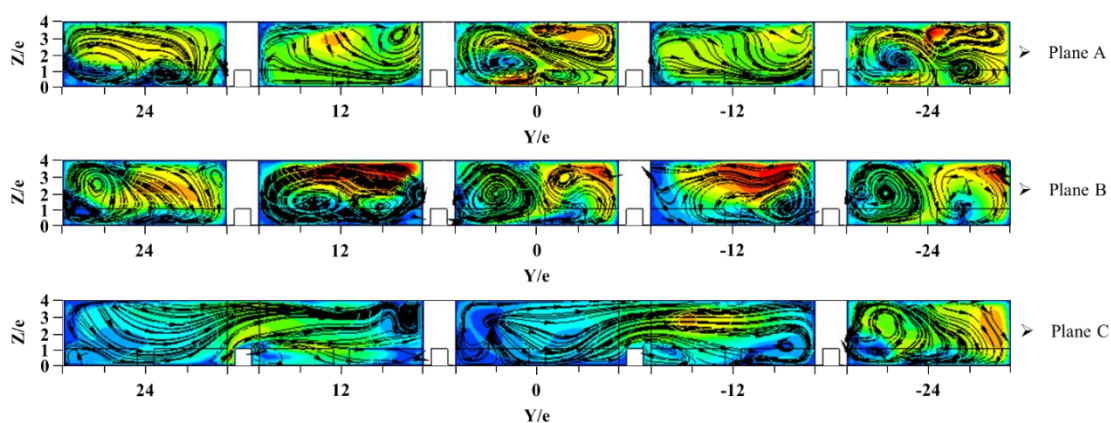
(ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.26 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบวม 45° บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวงกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )



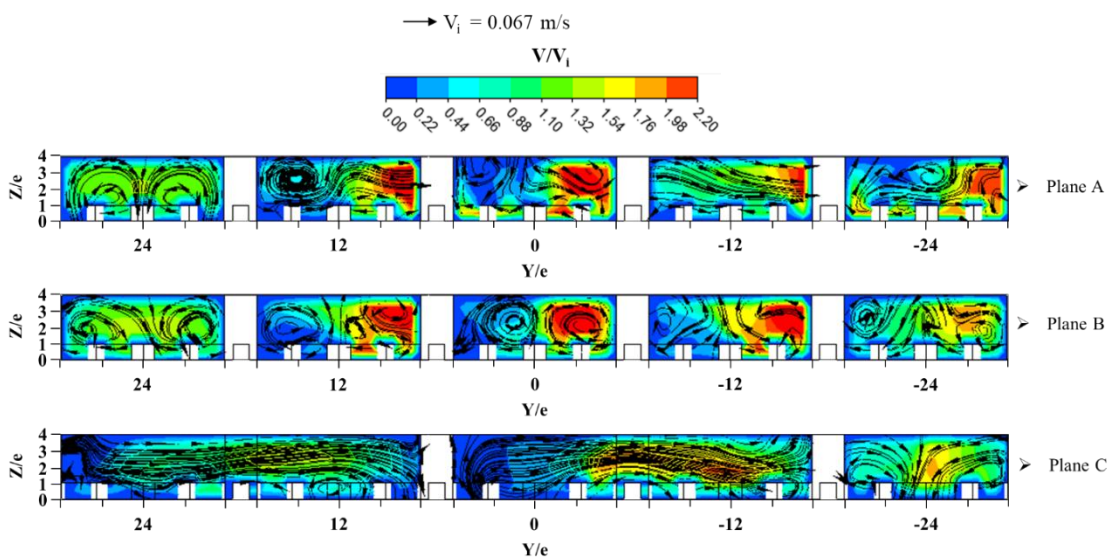


(ก) ครีบบแบบต่อเนื่อง

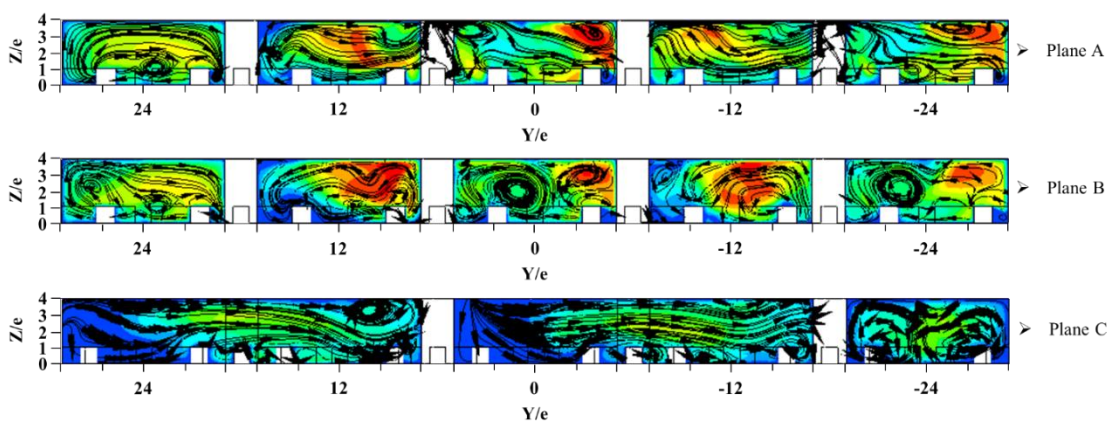


(ข) ครีบบแบบแตก

รูปที่ 4.27 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบวม  $60^\circ$   
 บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวงกลับ (ดังรูปที่ 4.23)  
 ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

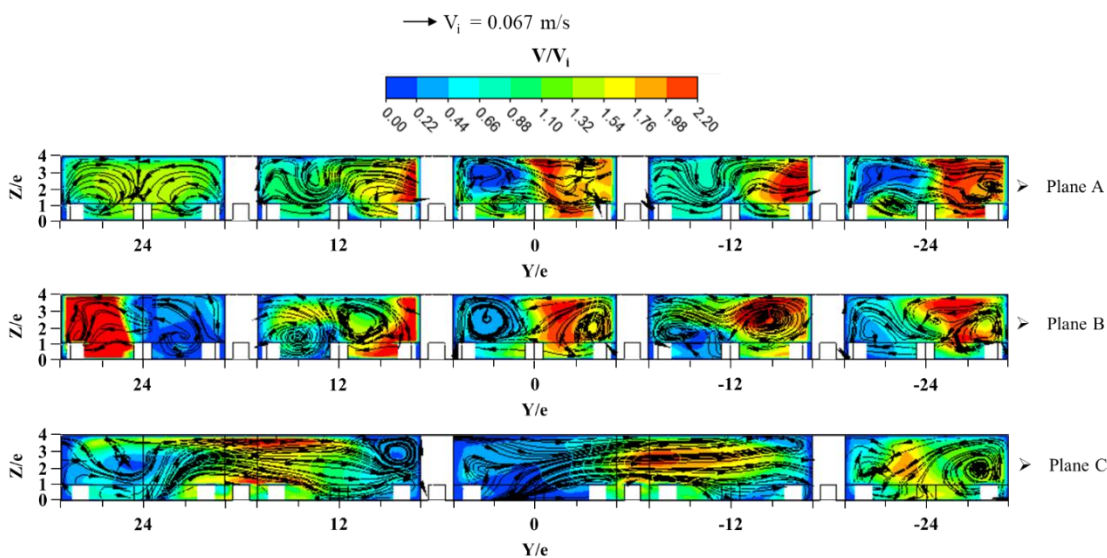


(ก) ครีบบนต่อเนื่อง

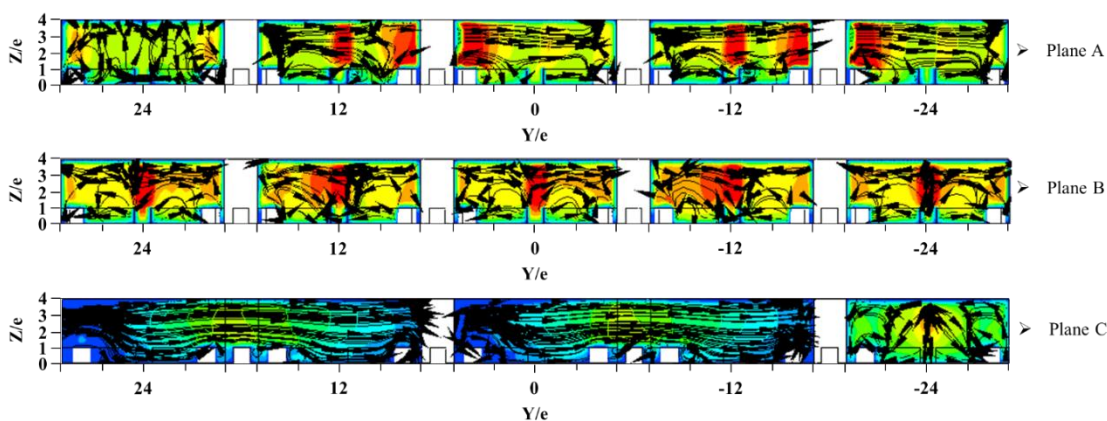


(ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.28 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนตัววีมุม  $30^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

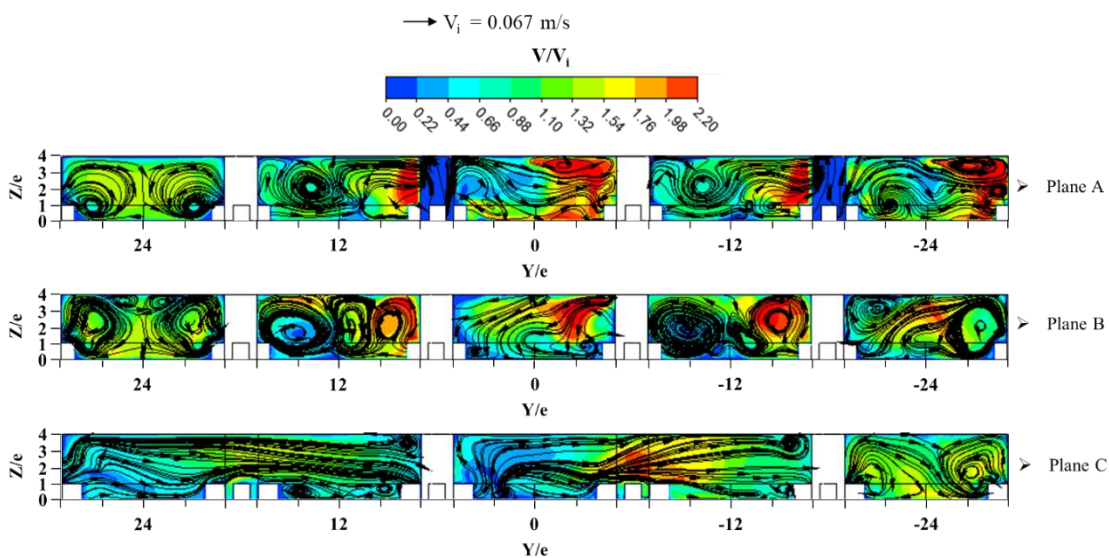


(ก) ครีบบแบบต่อเนื่อง

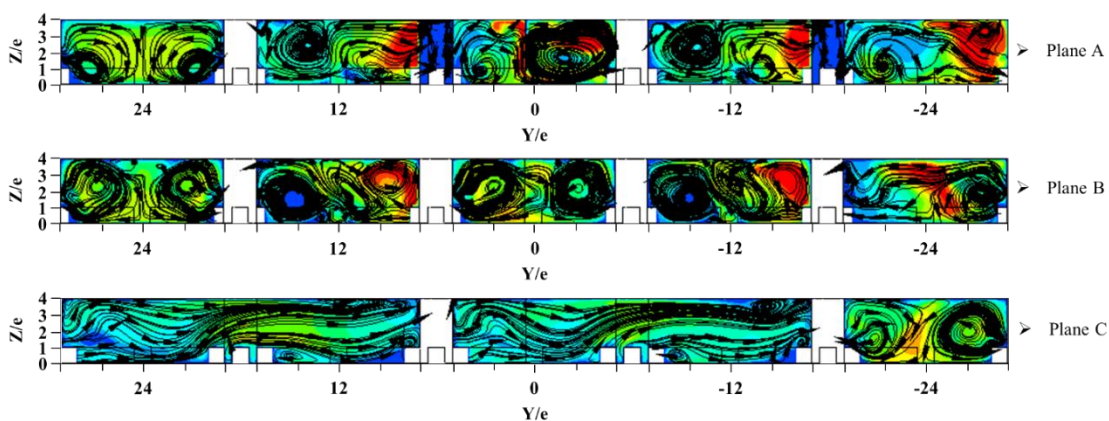


(ข) ครีบบแบบแตก

รูปที่ 4.29 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบริบตัววีมุม  $45^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )



(ก) ครีบบนต่อเนื่อง



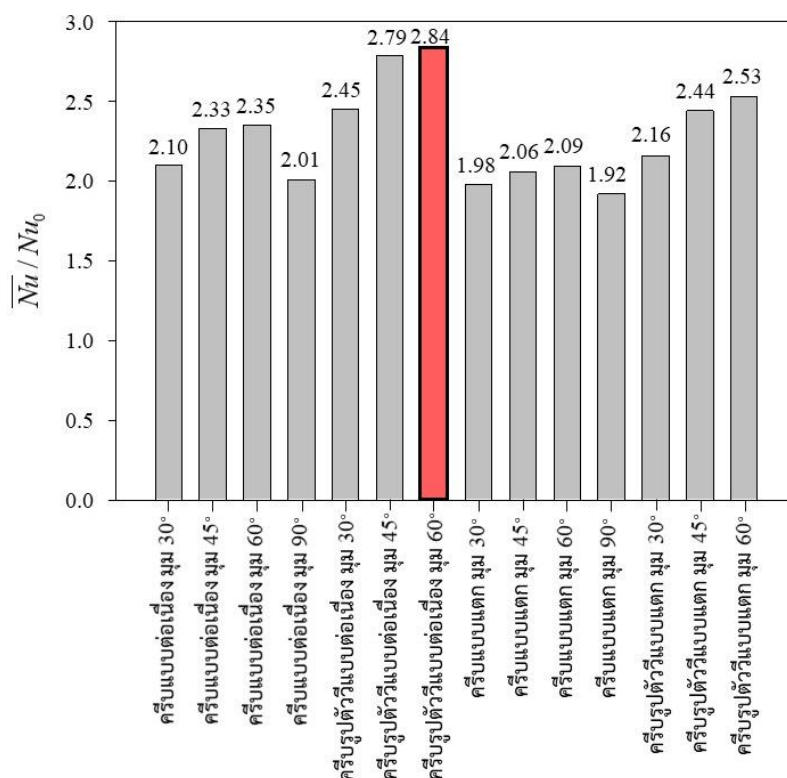
(ข) ครีบบนแตก

รูปที่ 4.30 การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วของครีบบนตัววีมุม  $60^\circ$  บนระนาบ Y-Z ที่ตำแหน่งระนาบ A, B, C ในช่องการไหลแบบวกกลับ (ดังรูปที่ 4.23) ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )



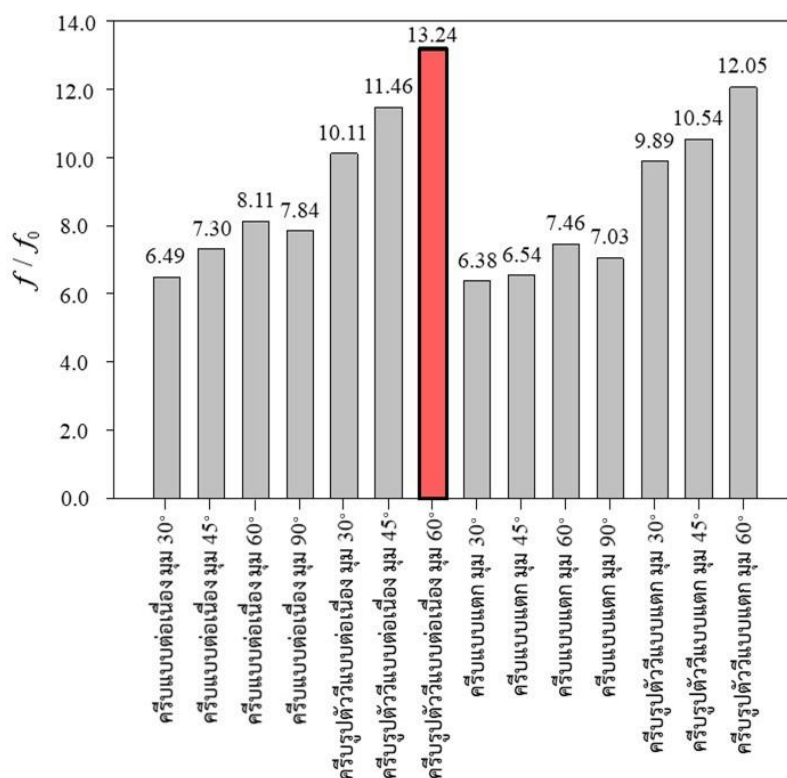
#### 4.2.6 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนของการจำลองการไหลบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน

จากการจำลองการไหลของน้ำผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน ทำให้ได้ผลของลักษณะการถ่ายเทความร้อนในรูปการกระจายของค่านัสเซลต์นัมเบอร์ และเมื่อทำการเฉลี่ยค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนนั้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.31 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนานเทียบกับพื้นผิวเรียบ ด้วยเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 400$ ) พบว่า กลุ่มครีบบนพื้นผิวจะให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับกลุ่มครีบบนผนังและเอียงทำมุมกับการไหล และพบว่าการติดตั้งครีบบนผนังและเอียงทำมุมกับการไหล และพบว่าการติดตั้งครีบบนผนังและเอียงทำมุมกับการไหล และพบว่าการติดตั้งครีบบนผนังและเอียงทำมุมกับการไหล โดยครีบบนพื้นผิวแบบต่องานมุม  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเท่ากับ 2.84, 2.79 และ 2.46 เท่า ตามลำดับเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบ ( $Nu_0$ ) ขณะที่การติดตั้งครีบบนผนังและเอียงทำมุม  $90^\circ$  ให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำที่สุดโดยเท่ากับ 1.92 เท่า



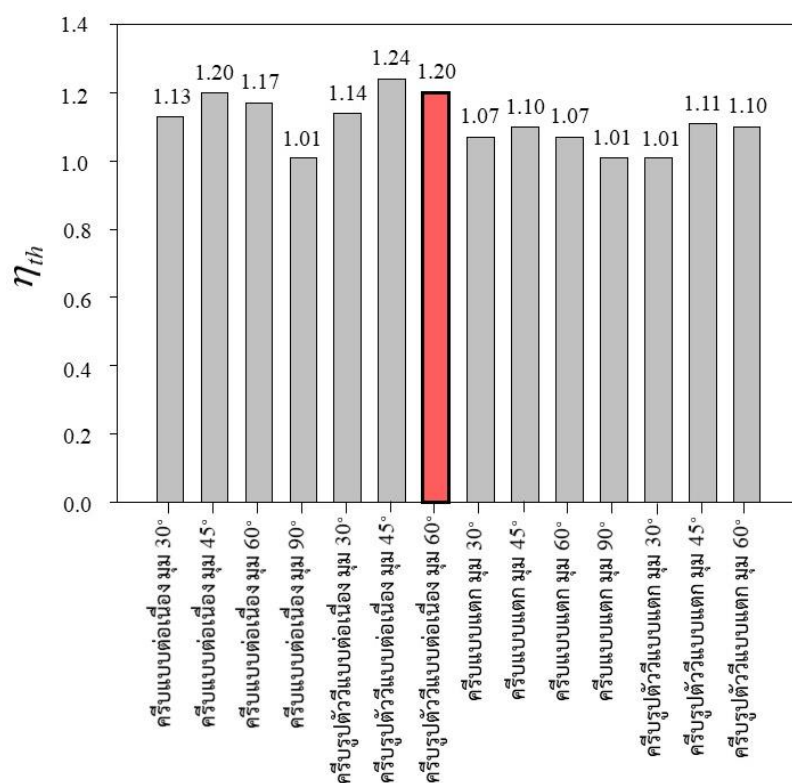
รูปที่ 4.31 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิวแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 400$ )

นอกจากคำนวณสเกลต์นัมเบอร์แล้ว การจำลองการไหลยังสามารถแสดงค่าการสูญเสียความดัน (Pressure drop) ของการไหลผ่านครีบที่ติดตั้งในช่องการไหลได้เช่นกัน เพื่อนำมาคำนวณค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ค่าการสูญเสียความดันจากการติดตั้งครีบและช่องการไหลจึงถูกคำนวณเป็นค่าตัวประกอบความเสียดทานและเปรียบเทียบกับพื้นผิวเรียบในรูปของอัตราส่วน ดังรูปที่ 4.32 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของการติดตั้งครีบในช่องการไหลแบบขนานเทียบกับพื้นผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) ด้วยเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 400$ ) พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของกลุ่มครีบบูปร่างตัววีมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับครีบบูปร่างอื่นๆ ที่มุมของครีบเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งครีบบรรณแบบต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่ากรณีครีบบนแบบแตก โดยครีบบูปร่างตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  ให้อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดโดยเท่ากับ 13.24 เท่า และรองลงมาคือครีบบูปร่างตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  โดยมีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเท่ากับ 11.46 และ 10.11 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบบูปร่างต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 400$ )

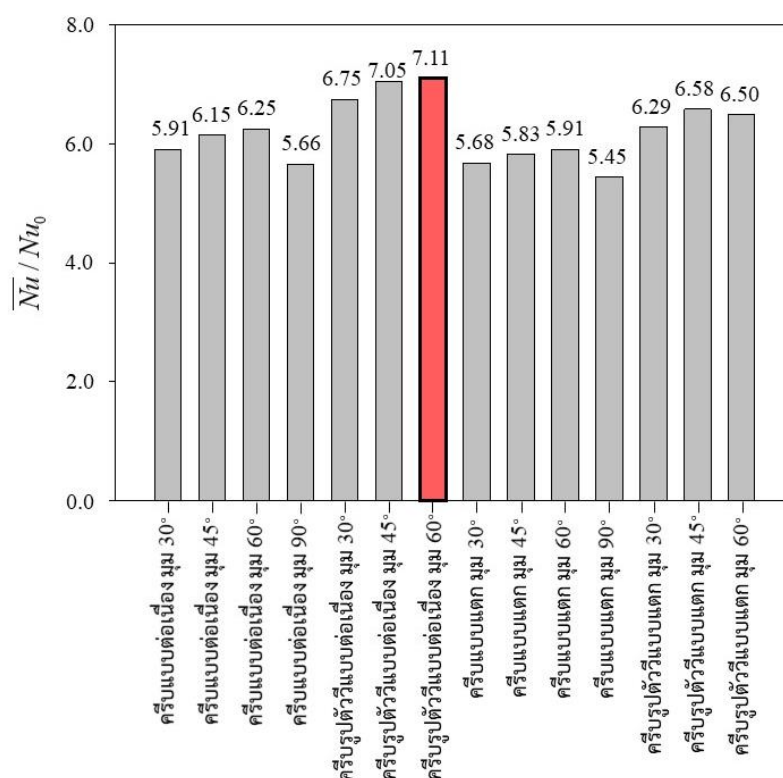
รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบทั้ง 14 รูปแบบในช่องการไหลแบบขนาน ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 400$ ) พบว่า สมรรถนะเชิงความร้อนของครีบทั้งแต่ละรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยครีบทังตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับครีบทังรูปแบบอื่นๆ โดยเท่ากับ 1.24 เท่า ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งสูงกว่าครีบทังตัววีแบบต่อเนื่องมุม 60° ที่มีค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์สูงสุด เนื่องจากมีตัวประกอบความเสียดทานที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.33 สมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบขนานที่ติดตั้งครีบทังรูปแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 400$ )

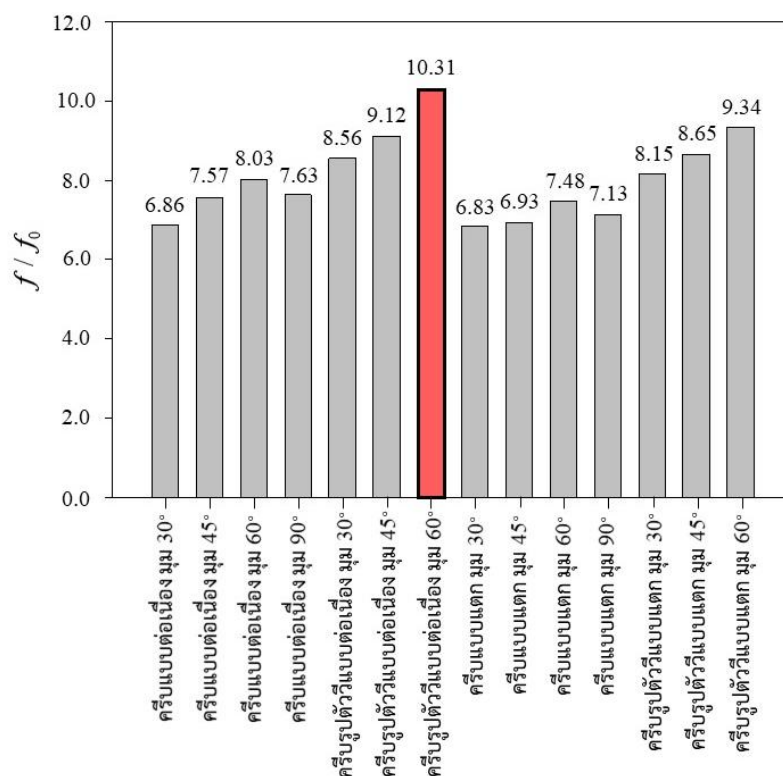
#### 4.2.7 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนของการจำลองการไหลบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับ

จากการจำลองการไหลของน้ำผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับ เมื่อทำการเฉลี่ยค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.34 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบววกกลับเทียบกับพื้นผิวเรียบ ( $\overline{Nu} / Nu_0$ ) ด้วยเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) พบว่ากลุ่มครีบบนพื้นผิวจะให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับกลุ่มครีบบนผนังและเอียงทำมุมกับการไหล และพบว่าการติดตั้งครีบบนผนังแบบต่อเนื่องจะให้ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีครีบบนผนังแบบแตก โดยครีบบนผนังแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเท่ากับ 7.12, 7.05 และ 6.75 เท่า ตามลำดับเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบ ( $Nu_0$ ) ขณะที่การติดตั้งครีบบนผนังแบบแตกมุม  $90^\circ$  ให้อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำที่สุดโดยเท่ากับ 5.45 เท่า



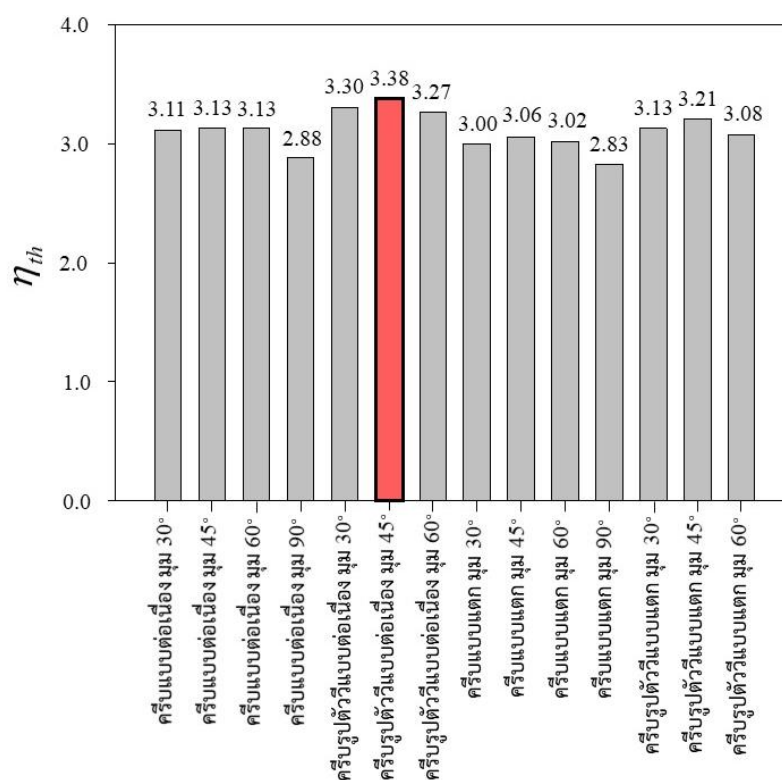
รูปที่ 4.34 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบววกกลับที่ติดตั้งครีบบนผนังแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

เช่นเดียวกับการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบขนาน ค่าการสูญเสียความดันจากการติดตั้งครีบบนและช่องการไหลแบบวงกลับถูกคำนวณเป็นค่าตัวประกอบความเสียดทานและเปรียบเทียบกับพื้นผิวเรียบในรูปของอัตราส่วน ดังรูปที่ 4.35 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของการติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบวงกลับเทียบกับพื้นผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) ด้วยเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำที่ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของกลุ่มครีบบนรูปตัววีมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับครีบบนรูปแบบอื่นๆ ที่มีมุมของครีบบนเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งครีบบนแบบต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าครีบบนแบบแตก โดยครีบบนรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  ให้ อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดที่เท่ากับ 10.31 เท่า และรองลงมาคือครีบบนรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  และ  $30^\circ$  โดยมีอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเท่ากับ 9.12 และ 8.56 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบวงกลับที่ติดตั้งครีบบนรูปแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบทั้ง 14 รูปแบบในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 4 LPM ( $Re = 2,000$ ) พบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนของครีบแต่ละรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยครีบบูทวิแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับครีบบูทวิแบบอื่นๆ โดยเท่ากับ 3.37 เท่า ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งสูงกว่าครีบบูทวิแบบต่อเนื่องมุม  $60^\circ$  เนื่องจากมีตัวประกอบความเสียดทานที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.36 สมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจำลองการไหลในช่องการไหลแบบวกกลับที่ติดตั้งครีบบูทวิแบบต่างๆ ที่อัตราการไหล 4 LPM ( $Re = 2,000$ )

#### 4.2.8 สรุปผลการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลติดครีบ

จากการศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้วิธีการจำลองการไหลของน้ำผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบและช่องการไหลในลักษณะต่างๆ โดยได้กำหนดเงื่อนไขขนาดโมเดลของช่องไหลในช่องการไหล รูปแบบครีบ ลักษณะช่องการไหล อัตราการไหล และค่าทางความร้อนให้เหมือนกับการทดลองทุกประการและเลือกใช้โมเดลความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport (SST) k- $\omega$  ในการคำนวณพบว่า

(1) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองและการจำลองการไหลนั้นมีความสอดคล้องกัน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านความแม่นยำในการคำนวณบริเวณใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนของโมเดลความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport (SST) k- $\omega$  นั้นอาจทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน 10-15% โดยการทดลองมีค่าสูงกว่า

(2) กลุ่มครีบริบรูปตัววีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแตกก่อให้เกิดคู่การไหลวนสวนทางกันส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น

(3) แนวโน้มค่าเฉลี่ยนัสเซิลต์นัมเบอร์ ค่าตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนมีความคล้ายคลึงกับการทดลอง คือ ครีบริบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  ในช่องการไหลแบบวกกลับให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด

จากการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบด้วยการทดลองและศึกษาลักษณะการไหลในช่องการไหลที่ติดครีบจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ข้อสรุปว่า ครีบริบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉพาะกรณีการติดครีบในช่องการไหลแบบวกกลับ และเมื่อวิเคราะห์จากลักษณะการไหล พบว่า การไหลผ่านครีบริบรูปตัววีจะสร้างคู่การไหลวนขึ้นภายในหน้าตัดช่องการไหล ซึ่งคู่การไหลวนนี้จะเหนี่ยวนำให้กระแสการไหลของน้ำพุ่งเข้าปะทะพื้นผิวถ่ายเทความร้อนส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกติดตั้ง ครีบริบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม  $45^\circ$  และช่องการไหลแบบวกกลับลงในโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผง



### 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T ติดตั้งครีบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน

แผง PV/T ที่ได้ติดตั้ง ครีบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° ลงในโมดูลระบายความร้อนถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนของแผง PV/T เทียบกับแผง PV ที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนใดๆ ในการทดสอบนั้นได้แบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขตามอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ชุดโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ซึ่งได้อ้างอิงจากการศึกษาในส่วนของถ่ายเทความร้อนในหัวข้อที่ 4.1 คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s การทดสอบได้กระทำที่สภาวะการใช้งานจริง (Normal climate conditions) ณ ดาดฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา และระหว่างการทดสอบได้เก็บค่าอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิแผง PV และ PV/T อุณหภูมิน้ำน้ำ-ออกโมดูลระบายความร้อน อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ค่าความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. ของการทดสอบในแต่ละวันแล้วนำมาคำนวณเป็นค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้ต่อวัน ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน รวมถึงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบและสรุปผลการวิจัย



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายระบบแผง PV/T และแผง PV สำหรับการทดสอบจริง ที่ติดตั้ง ณ ดาดฟ้า ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (พิกัด 7° 00' 15.6"N 100° 30' 65.4" E)

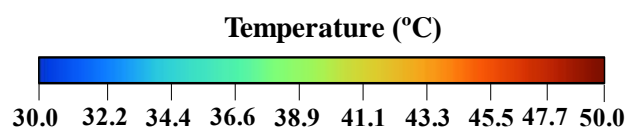
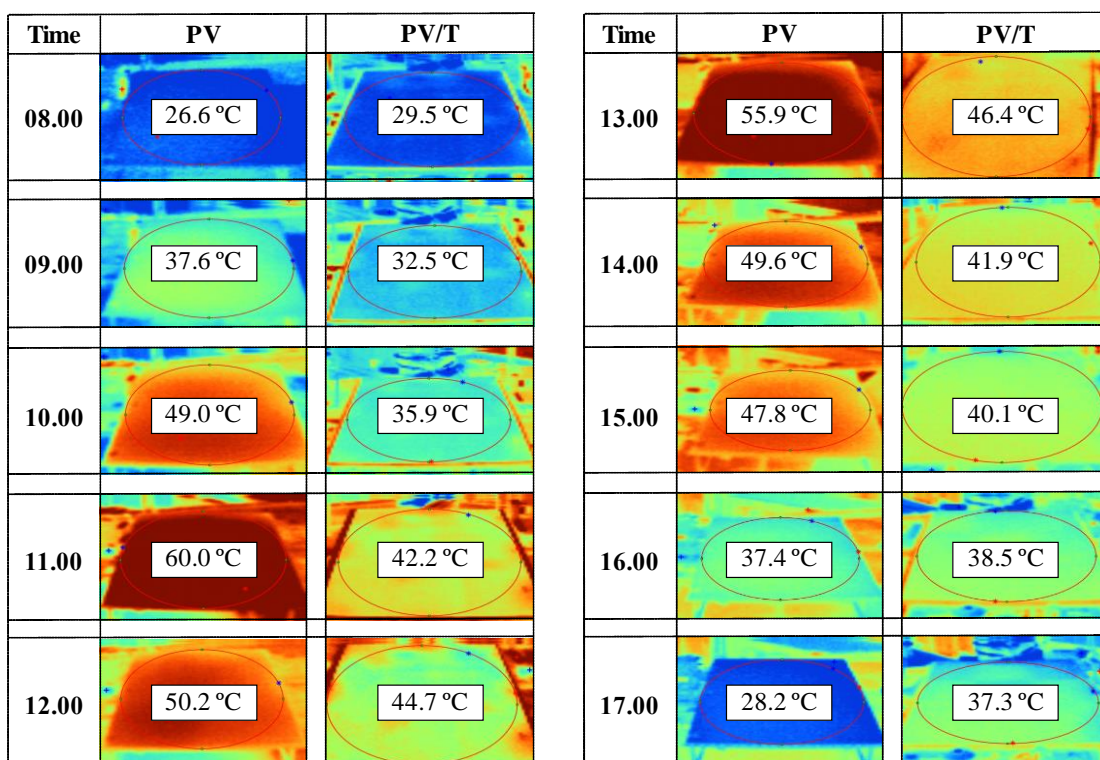


#### 4.3.1 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T

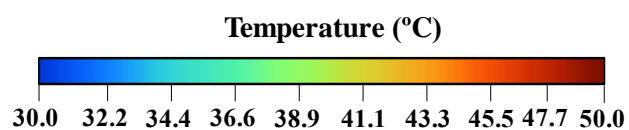
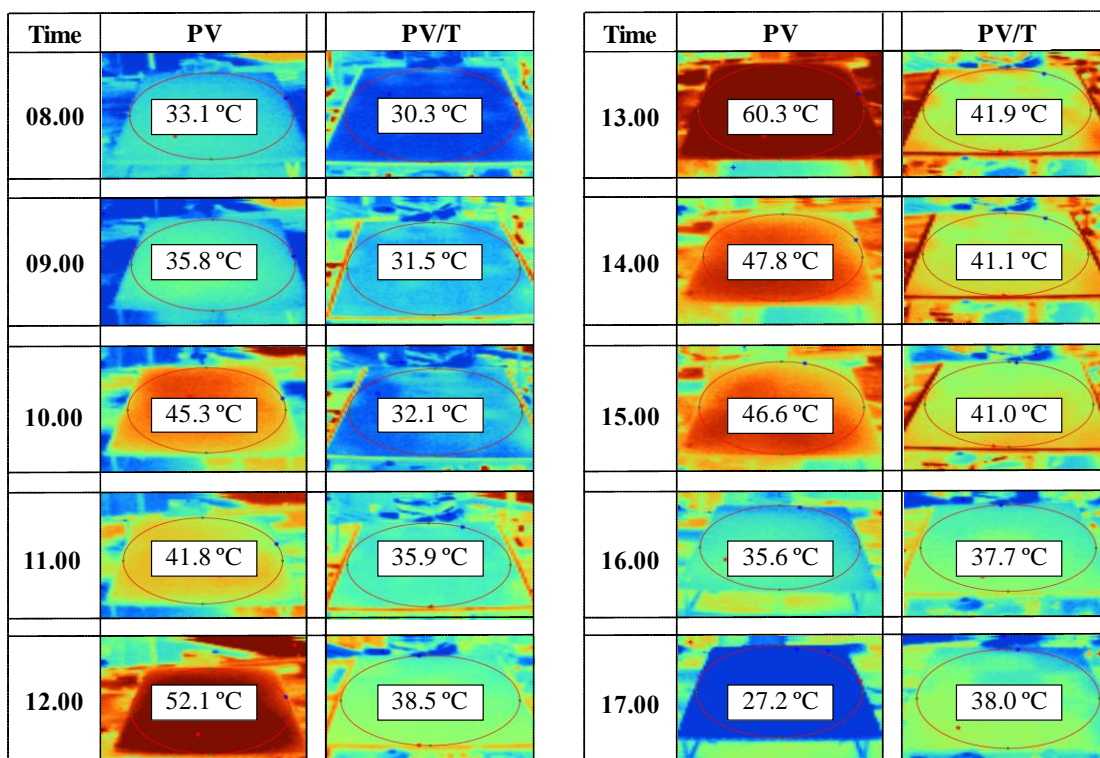
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T ขณะที่ทำการทดสอบนั้น ถูกถ่ายและบันทึกภาพโดยกล้องอินฟราเรด เพื่อเปรียบเทียบการกระจายและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงระหว่างแผง PV และ PV/T ณ เวลาเดียวกัน โดยในการถ่ายและบันทึกภาพนั้นจะทำทุกๆ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. ของวันที่ทำการทดสอบ การกระจายและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T ที่อัตราการไหลน้ำ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ถึง 4.40 ตามลำดับ

รูปที่ 4.38 ถึง 4.40 ได้แสดงการเปรียบเทียบของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงระหว่างแผง PV และ PV/T ที่ทั้ง 3 อัตราการไหล พบว่าโดยรวมนั้นผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T ที่ทั้ง 3 อัตราการไหลมีรูปแบบที่เหมือนกัน คือ ตั้งแต่เริ่มทดสอบถึง 15.00 น. ของแต่ละวัน พบว่า อุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 8.1 °C และพบว่าผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 18.4 °C แต่ขณะที่เวลา 08.00 น. และตั้งแต่เวลา 16.00 น. เป็นต้นไปนั้น อุณหภูมิของแผง PV/T จะมาค่าที่สูงกว่าแผง PV เนื่องจากอุณหภูมิน้ำของระบบแผง PV/T ในช่วงเริ่มต้นมีค่าประมาณ 30 °C ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของน้ำเข้าสู่แผง และในช่วงท้ายของการทดสอบอุณหภูมิของอากาศจะลดลงอย่างกระทันหันตามความเข้มแสงทำให้แผง PV ที่ด้านหลังแผงทำจากอลูมิเนียมนั้นสามารถคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้รวดเร็วกว่าน้ำในแผง PV/T ซึ่งหุ้มด้วยฉนวน

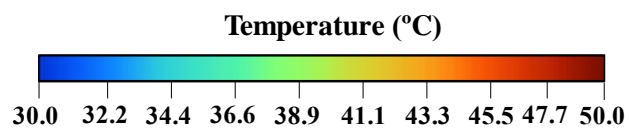
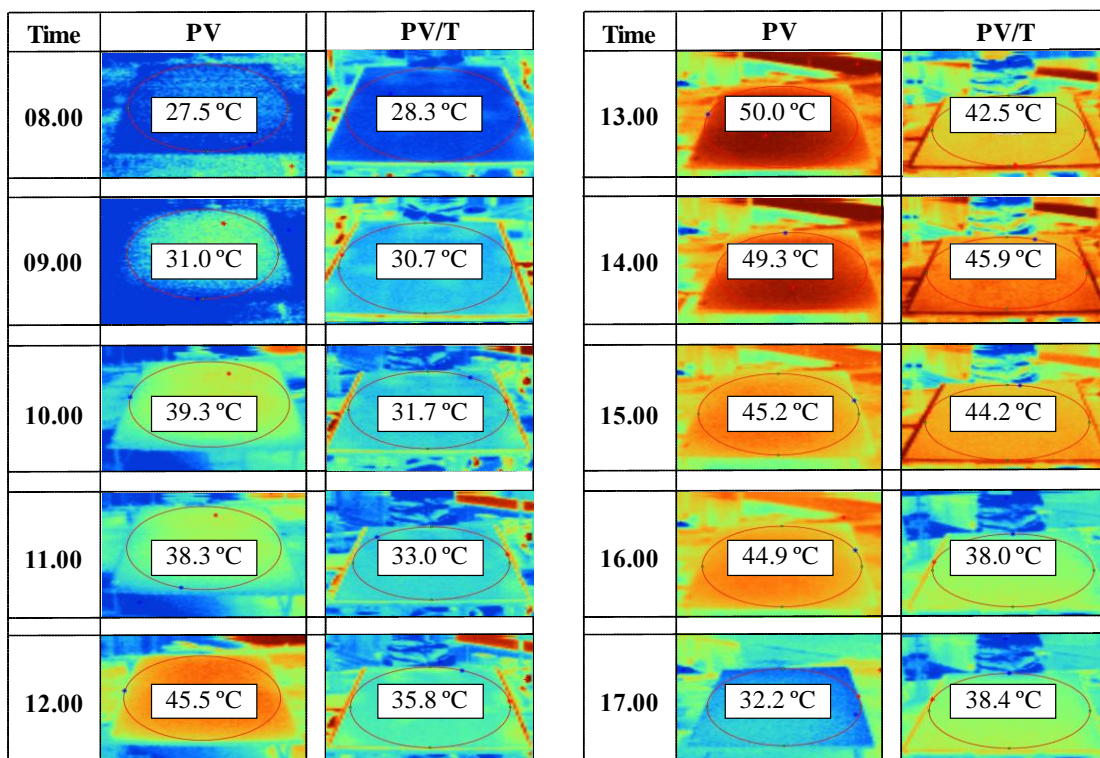
ต่อไปจะเป็นการแสดงผลของการวัดอุณหภูมิภายในระบบ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในระหว่างการวัดและค่าพลังงานรวมที่ได้ต่อวันของแผง PV และ PV/T ที่การทดสอบทั้ง 3 อัตราการไหล



รูปที่ 4.38 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s จากการทดสอบวันที่ 22 เมษายน 2562



รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s จากการทดสอบวันที่ 24 เมษายน 2562



รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวรับแสงของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s จากการทดสอบวันที่ 1 พฤษภาคม 2562

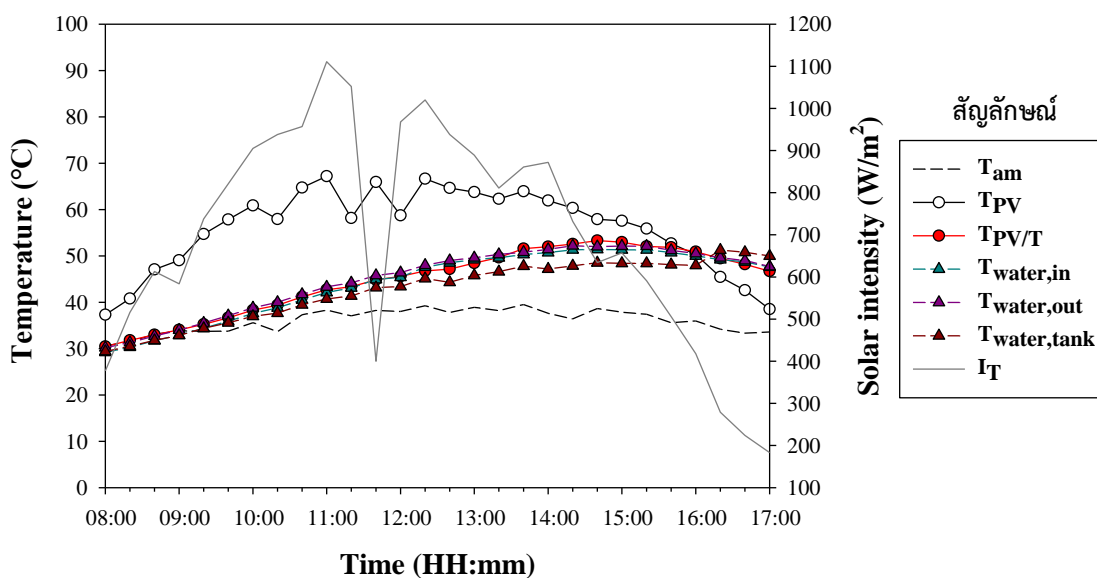
### 4.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ กำลังไฟฟ้า และพลังงานที่แผง PV และ PV/T ผลิตได้ ต่อวัน

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งครบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนเทียบกับแผง PV แบบทั่วไปนั้น ค่าอุณหภูมิแผง อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก โมดูลระบายความร้อน อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และค่าความเข้มแสงนั้น ถูกจัดแสดงในรูปของกราฟเทียบกับเวลาในวันที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ถึง 4.52 และนอกจากนั้นได้มีการแสดงค่าพลังงานที่ผลิตได้จากแผง PV และแผง PV/T จากการคำนวณด้วยเช่นกัน

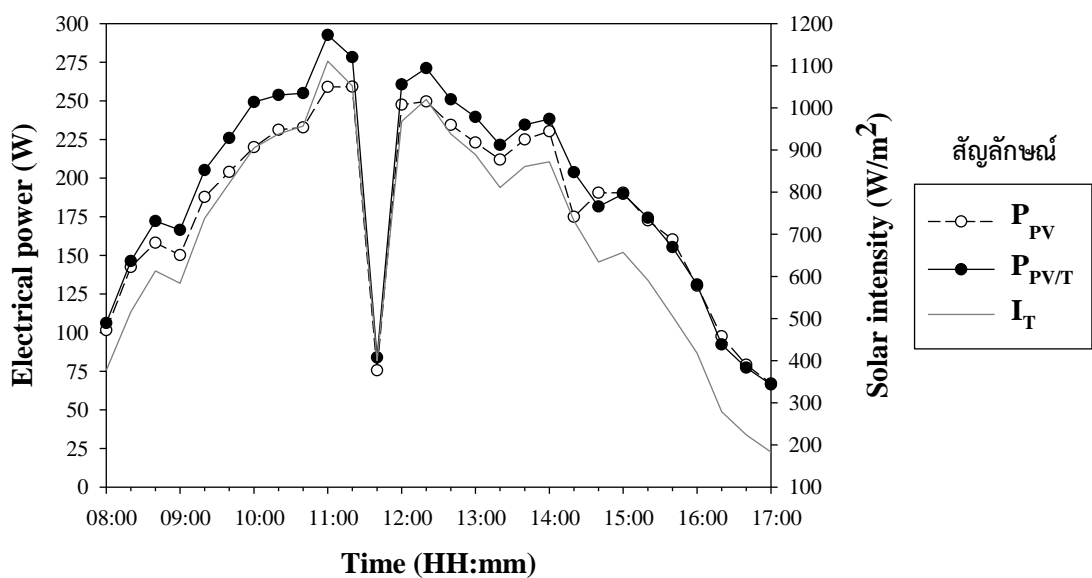
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 22 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.40 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T ค่อนข้างมาก โดยที่เวลา 11.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 1,150 W/m<sup>2</sup> พบว่าอุณหภูมิของแผง PV สูงกว่าแผง PV/T ถึง 20 °C ขณะที่ตั้งแต่เวลา 15.40 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของแผง PV/T กลับสูงกว่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่สะสมภายในน้ำของระบบ และอุณหภูมิของอากาศที่ลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้แผง PV สามารถคายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

รูปที่ 4.42 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลากการทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 0.5 kg/s ณ วันที่ 22 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 14.20 น. นั้น กำลังไฟฟ้าที่แผง PV/T ผลิตได้จะมีค่าสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 11.3 W และที่เวลา 11.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดในวันที่ทำการทดสอบนั้น พบว่าแผง PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าแผง PV ถึง 30 W แต่ตั้งแต่เวลา 14.40 น. เป็นต้นไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบนั้น แผง PV/T จะมีกำลังไฟฟาลดลงและต่ำกว่าแผง PV แต่ไม่มากนัก สาเหตุจากความร้อนที่สะสมอยู่ในน้ำซึ่งไหลวนภายในระบบตลอดการทดสอบ

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 22 เมษายน 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ ด้วยสมการที่ 3.20 และ 3.22 พบว่าแผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.72 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.82 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 4.77 kWh/day



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{am}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{pv}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{pv/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 22 เมษายน 2562

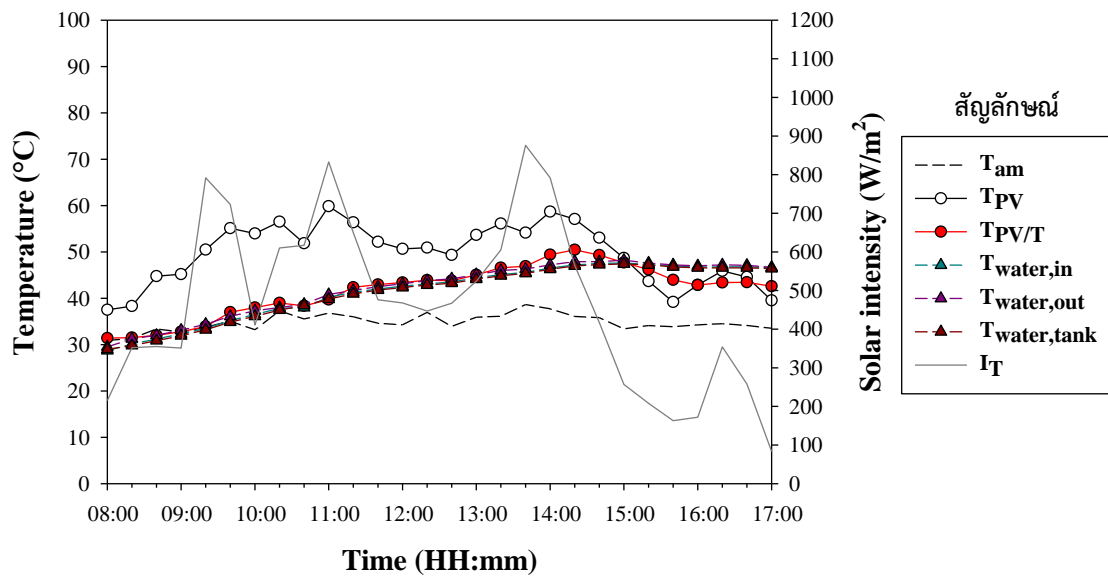


รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{pv}$ ) และแผง PV/T ( $P_{pv/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 22 เมษายน 2562

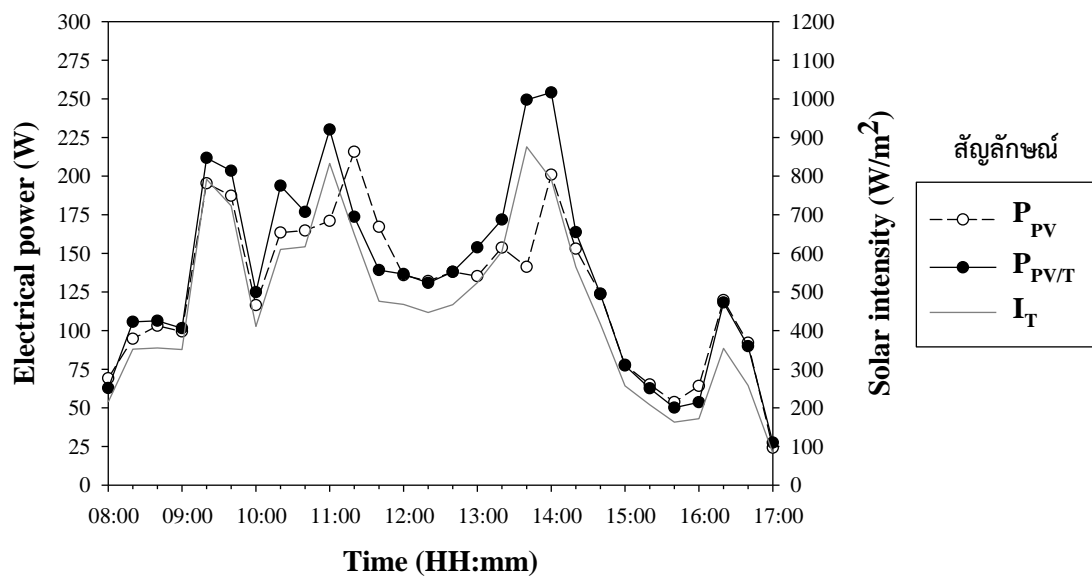
รูปที่ 4.43 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 23 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 8.2 °C และที่เวลา 11.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 833 W/m<sup>2</sup> พบว่าอุณหภูมิของแผง PV สูงกว่าแผง PV/T ถึง 20 °C โดยในวันที่ทดสอบนั้นความเข้มแสงมีค่าค่อนข้างไม่สม่ำเสมอและลดลงอย่างกะทันหันตั้งแต่เวลา 14.20 น. เป็นต้นไป ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลทำให้แผง PV สามารถคายความร้อนได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน

รูปที่ 4.44 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลารทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 1.0 kg/s ณ วันที่ 23 เมษายน 2562 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงทั้ง 2 ชนิดมีการแกว่งที่มากเนื่องจากความเข้มแสงในวันที่ทดสอบนั้นไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้แสดงเป็นผลค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดการทดลองของแผงทั้ง 2 ระบบ โดยแผง PV มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 127.05 W และแผง PV/T มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 136.81 W

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 23 เมษายน 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ พบว่า แผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.19 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.29 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 4.04 kWh/day



รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{am}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{PV}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 23 เมษายน 2562



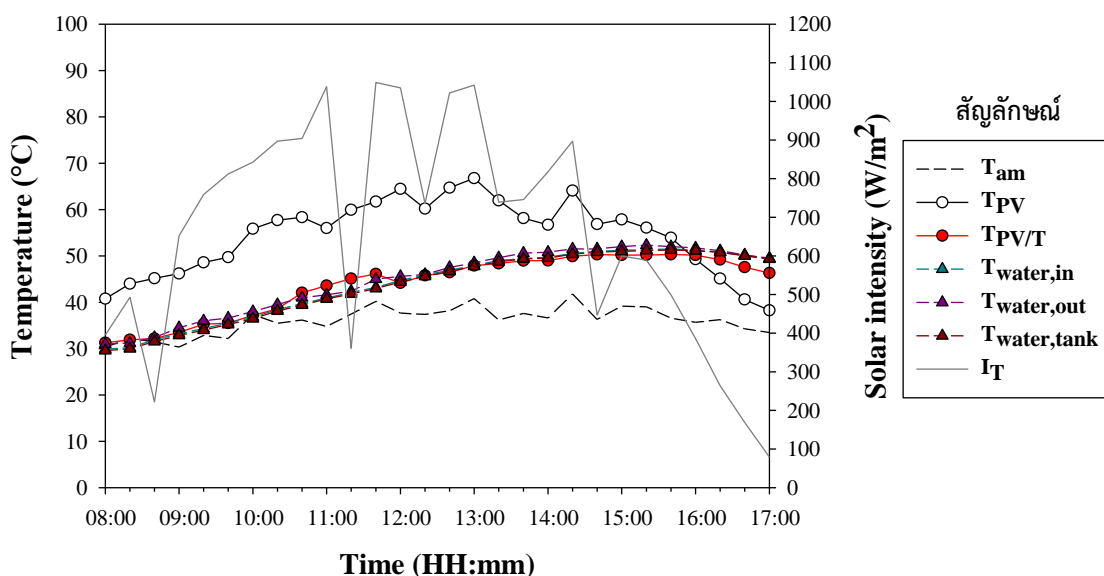
รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{PV}$ ) และแผง PV/T ( $P_{PV/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 23 เมษายน 2562



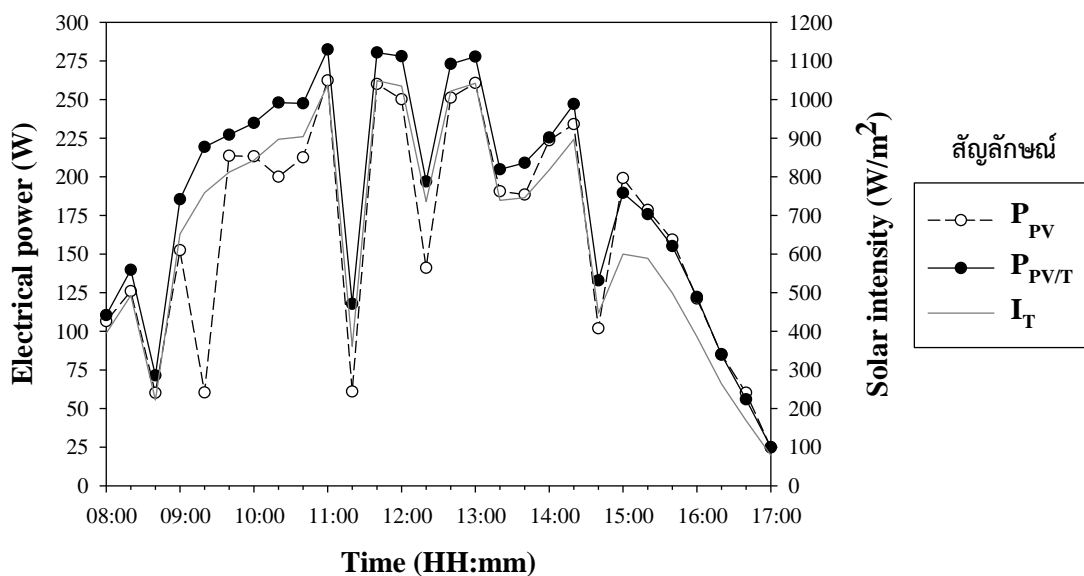
รูปที่ 4.45 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 24 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 10.4 °C และที่เวลา 13.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 1,150 W/m<sup>2</sup> พบว่าอุณหภูมิของแผง PV สูงกว่าแผง PV/T ถึง 19 °C นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของแผง PV จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับอากาศอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ตั้งแต่เวลา 16.00 น. เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงลดลงอย่างต่อเนื่องนั้นอุณหภูมิของแผง PV จะต่ำกว่าแผง PV/T

รูปที่ 4.46 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลารทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 1.0 kg/s ณ วันที่ 24 เมษายน 2562 พบว่า ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 14.40 น. ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T จะสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 22.15 และ ณ เวลา 11.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดในวันที่ทำการทดสอบนั้นพบว่า แผง PV/T มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าแผง PV ถึง 25 W ขณะที่ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบนั้น แผง PV/T จะมีกำลังไฟฟ้าที่ลดลงและต่ำกว่าแผง PV แต่ไม่ชัดเจนนักเนื่องจากความเข้มแสงที่มีค่าต่ำ

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 24 เมษายน 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ พบว่า แผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.54 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.75 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 4.59 kWh/day



รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{am}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{PV}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 24 เมษายน 2562

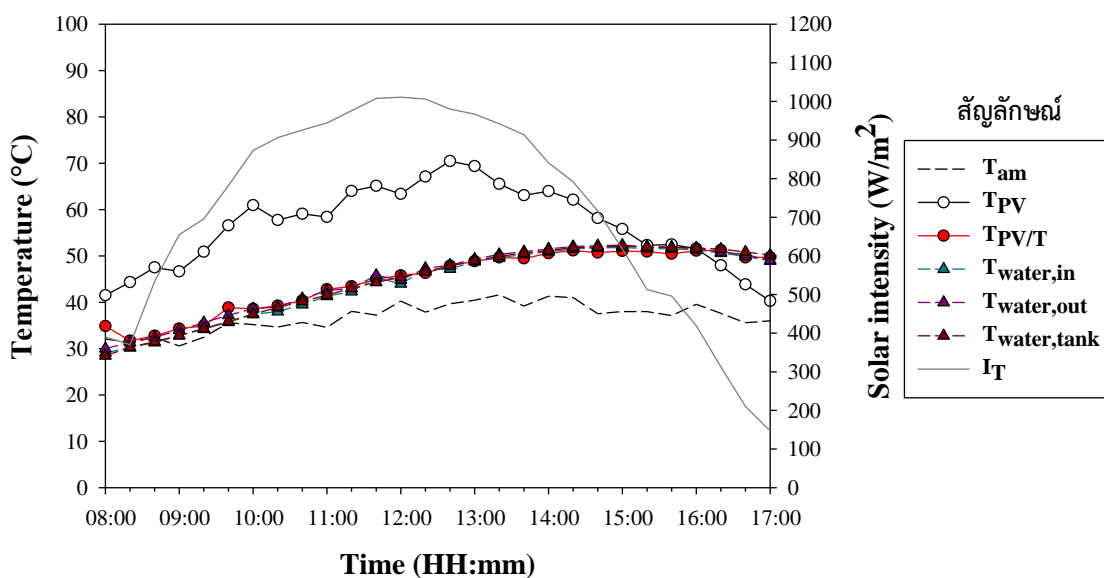


รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{PV}$ ) และแผง PV/T ( $P_{PV/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 24 เมษายน 2562

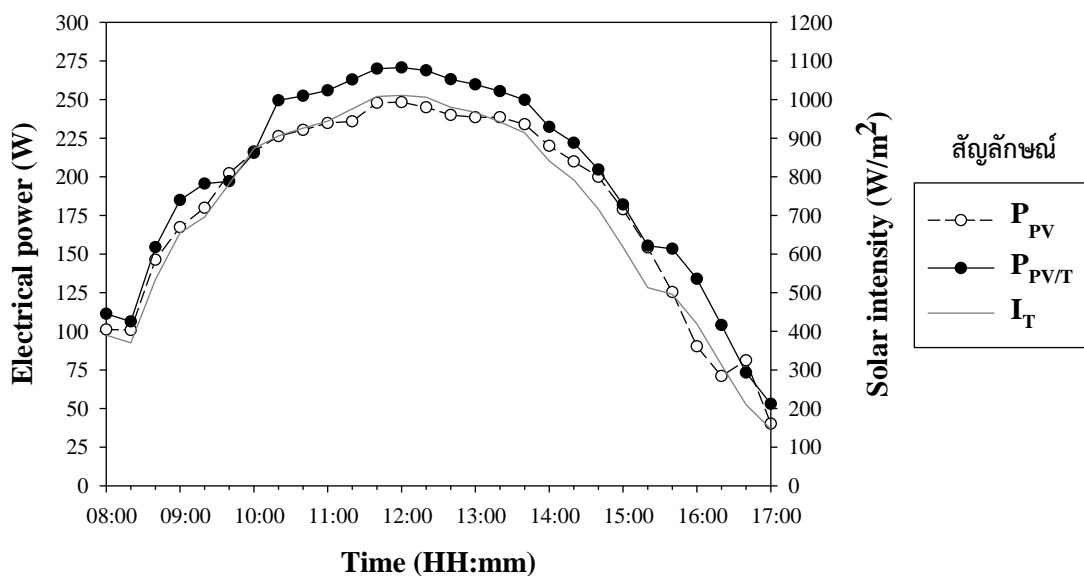
รูปที่ 4.47 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 25 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 11.87 °C และที่เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 1,000 W/m<sup>2</sup> พบว่าอุณหภูมิของแผง PV สูงกว่าแผง PV/T ถึง 17 °C ขณะที่ตั้งแต่เวลา 16.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของแผง PV/T กลับสูงกว่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่สะสมภายในน้ำของระบบ

รูปที่ 4.48 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลาการทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 0.5 kg/s ณ วันที่ 25 เมษายน 2562 พบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. นั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่แผง PV/T ผลิตได้จะมีค่าสูงกว่าแผง PV ตลอดระยะเวลาการทดสอบเนื่องจากความเข้มแสงและอุณหภูมิอากาศที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยเฉลี่ยตลอดการทดลองนั้น PV/T จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแผง PV ที่ 15.5 W ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับการทดสอบที่ผ่านมาเนื่องจากความเข้มแสงนั้นมีค่าต่ำ

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 25 เมษายน 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ พบว่า แผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.71 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.86 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 5.04 kWh/day



รูปที่ 4.47 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{amb}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{PV}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 25 เมษายน 2562

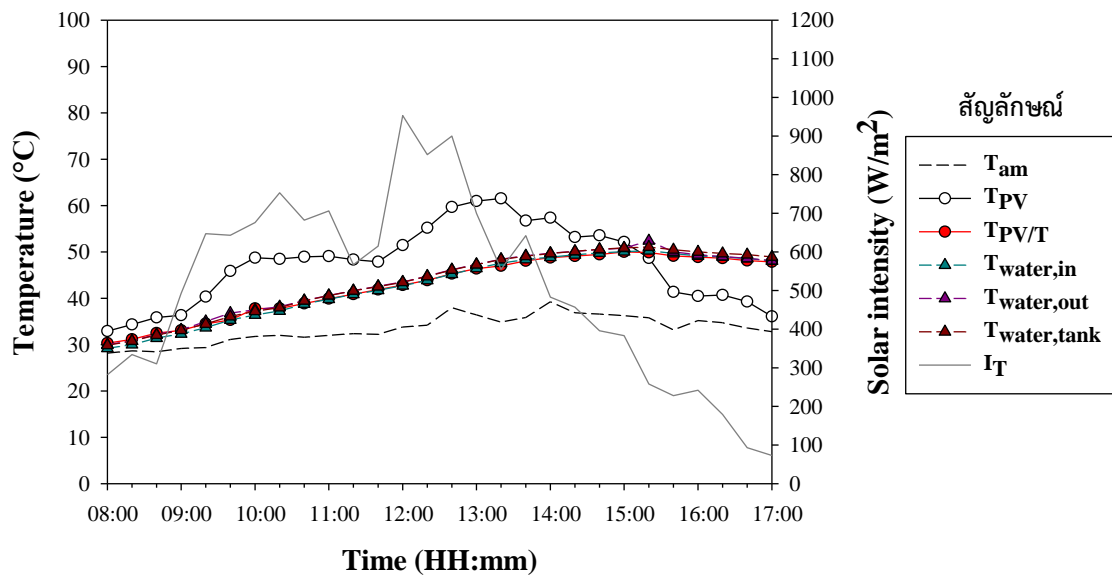


รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{PV}$ ) และแผง PV/T ( $P_{PV/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 25 เมษายน 2562

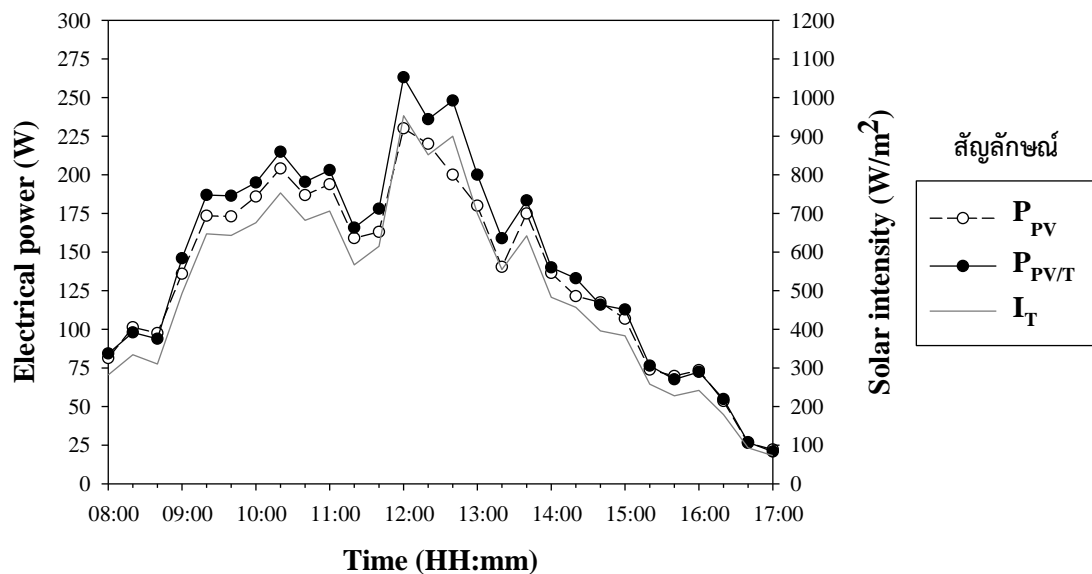
รูปที่ 4.49 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 28 เมษายน 2562 พบว่า ในวันที่ทำการทดสอบนั้นค่าความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแผง PV และ PV/T มีค่าน้อย โดยตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 8 °C และที่เวลา 12.40 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 900 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T ประมาณ 15 °C

รูปที่ 4.50 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลากการทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 1.5 kg/s ณ วันที่ 28 เมษายน 2562 เนื่องจากในวันที่ทำการทดสอบนั้นมีค่าความเข้มแสงที่ต่ำมาก โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 503.64 W/m<sup>2</sup> ทำให้แผง PV/T มีกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าแผง PV เพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันนั้นแผง PV/T มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแผง PV เท่ากับ 9.13 W

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 28 เมษายน 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ พบว่า แผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.27 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.36 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 4.42 kWh/day



รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{amb}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{PV}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 28 เมษายน 2562

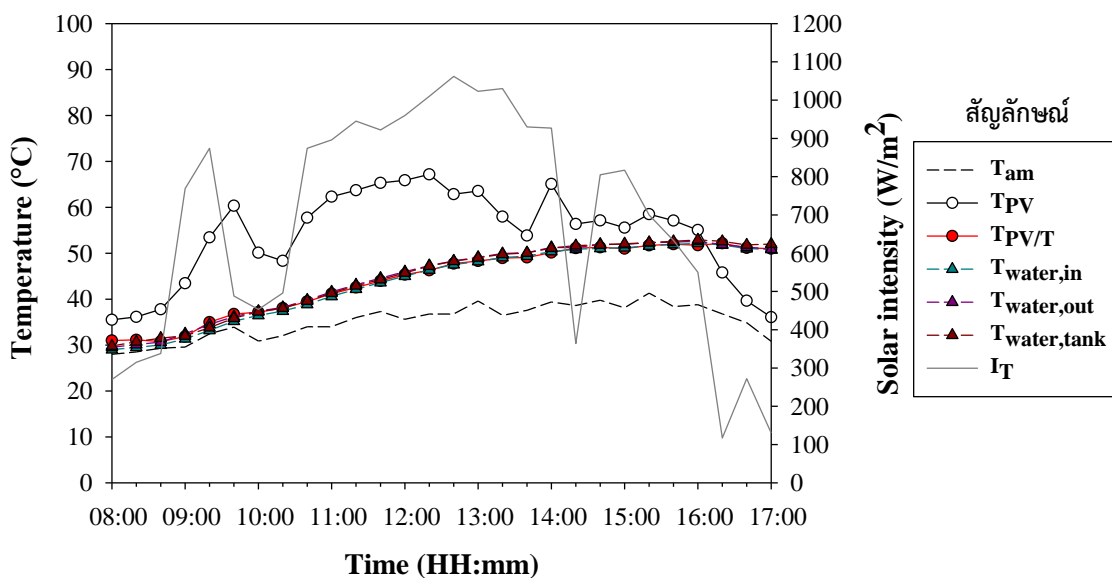


รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{PV}$ ) และแผง PV/T ( $P_{PV/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 28 เมษายน 2562

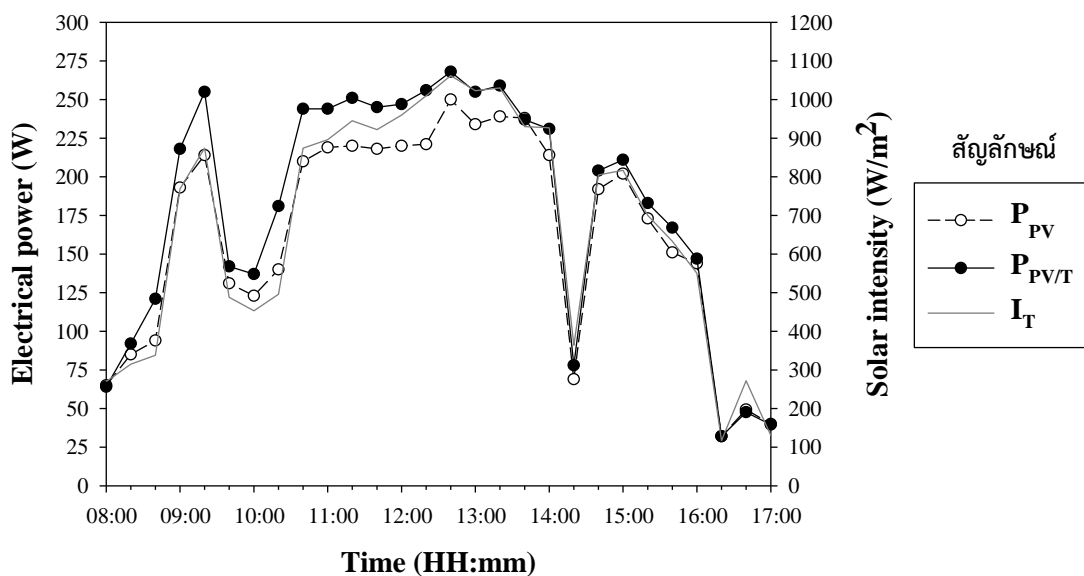
รูปที่ 4.51 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของแผง PV อุณหภูมิของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s ซึ่งได้ทำการทดสอบ ณ วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 พบว่า ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยที่ 9.89 °C และที่เวลา 12.20 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 1,000 W/m<sup>2</sup> ทำให้อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T ประมาณ 21 °C แต่หลังจากเวลา 16.20 น. เป็นต้นไปอุณหภูมิของแผง PV จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงที่ลดลงอย่างฉับพลัน

รูปที่ 4.52 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV และ PV/T ในแต่ละช่วงเวลารทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T ที่ 1.5 kg/s ณ วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 พบว่า ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง PV/T นั้นจะสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 17 W แต่หลังจากเวลา 16.00 น. เป็นต้นไปนั้นกำลังไฟฟ้าของแผง PV/T กลับต่ำกว่าแผง PV เพียงเล็กน้อย

โดยเมื่อสรุปการทดสอบในวันที่ 1 พฤษภาคม 2562 ด้วยการคำนวณค่าพลังงานที่ระบบผลิตได้จากกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในทดสอบ พบว่า แผง PV มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.54 kWh/day และแผง PV/T มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 1.70 kWh/day และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวันเท่ากับ 5.16 kWh/day



รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ ( $T_{amb}$ ) อุณหภูมิของแผง PV ( $T_{PV}$ ) อุณหภูมิของแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ) อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{water,in}$ ) อุณหภูมิน้ำออก ( $T_{water,out}$ ) โมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{water,tank}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) วันที่ 1 พฤษภาคม 2562



รูปที่ 4.52 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV ( $P_{PV}$ ) และแผง PV/T ( $P_{PV/T}$ ) กับความเข้มแสง ( $I_T$ ) ตามช่วงเวลาการทดสอบ วันที่ 1 พฤษภาคม 2562



ตารางที่ 4.1 พลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้จากแผง PV/T ในแต่ละวันที่ทำการทดสอบ

วันที่	$I_{T,avg}$ (W/m <sup>2</sup> )	แผง PV	แผง PV/T		
		$E_{el}$ (kWh/day)	$E_{el}$ (kWh/day)	$E_{th}$ (kW/day)	$E_{use}$ (kW/day)
22/04/2562	700	1.72	1.82	4.77	0.03
23/04/2562	466	1.19	1.29	4.04	0.1
24/04/2562	660	1.54	1.75	4.59	0.1
25/04/2562	712	1.71	1.86	5.04	0.03
28/04/2562	504	1.27	1.36	4.42	0.35
01/05/2562	678	1.54	1.70	5.16	0.35

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานของแผง PV/T ในทั้ง 6 วัน สามารถสรุปค่าพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในแต่ละวันดังแสดงตามตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าแผง PV/T นั้นมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันสูงกว่าแผง PV ในทุกๆการทดสอบ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วแผง PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าแผง PV ที่ 0.14 kWh/day และนอกจากนี้แผง PV/T ยังสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้โดยเฉลี่ยที่ 4.67 kWh/day ได้อีกด้วย

หากพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของระบบกับความเข้มแสงพบว่า โดยทั่วไปในช่วง 08.00 น. ถึง 15.00 น. ของวันที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยตลอดทั้งช่วงประมาณ 8 ถึง 10 °C และมีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 21 °C ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงที่ความเข้มแสงมีค่าสูง อุณหภูมิของแผง PV จะมีความไวต่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศเป็นอย่างมาก โดยเมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศลดลงอย่างฉับพลัน อุณหภูมิของแผง PV จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน แต่สำหรับแผง PV/T นั้น อุณหภูมิของแผงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการรับแสงซึ่งมีแนวโน้มที่สม่ำเสมอ และสำหรับอุณหภูมิของน้ำในระบบ PV/T ก็เช่นเดียวกัน โดยทั้งอุณหภูมิของแผง PV/T และอุณหภูมิของน้ำในระบบจะลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายของการทดสอบเนื่องจากความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศที่ต่ำลง

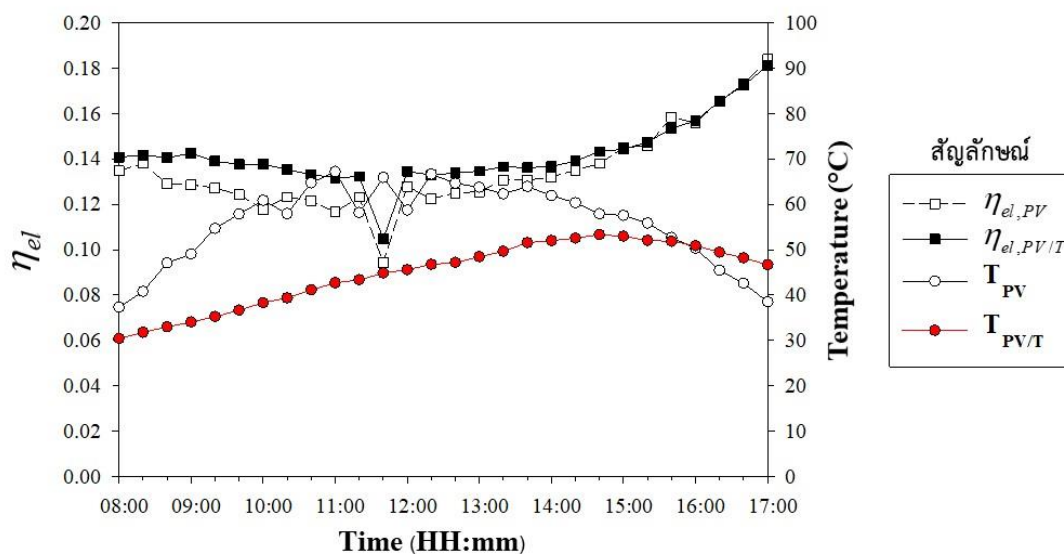
สำหรับการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV และ PV/T กับระยะเวลาในการทดสอบ พบว่า โดยทั่วไปแล้วตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง PV/T จะสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 14.13 W และมีค่ามากที่สุดที่ 30 W โดยทั้งค่าอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าของทั้งสองระบบนี้จะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอย่างเห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงท้ายของการทดสอบซึ่งมีค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศต่ำลงนั้น แผง PV จะคายความร้อนได้เร็วกว่าแผง PV/T เนื่องจากด้านหลังของแผง PV/T ได้มีการหุ้มฉนวนกัน

ความร้อนแต่ถึงกระนั้นก็ได้ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากนัก เนื่องจากความเข้มแสงในช่วงทำยนั้นมีความต่ำมาก

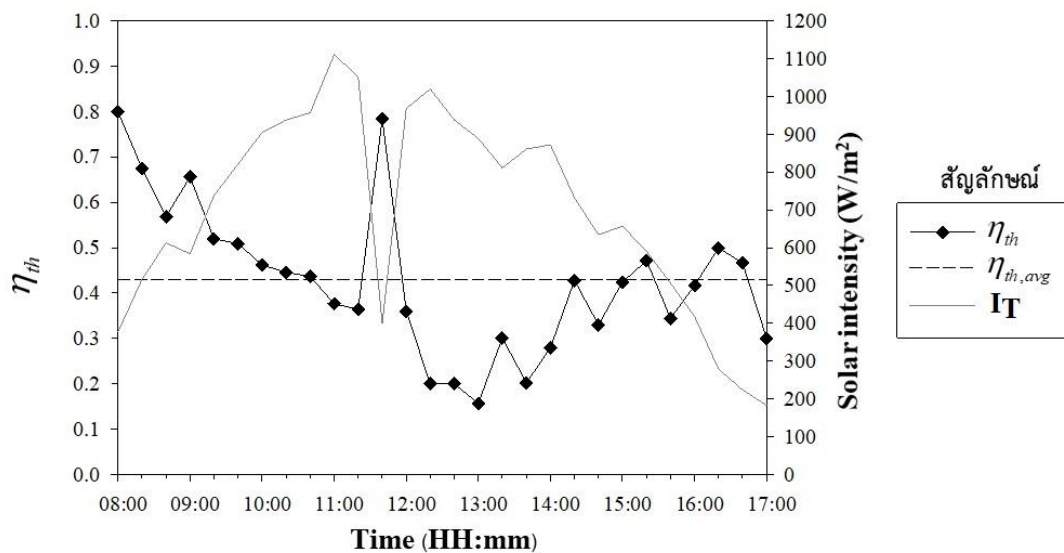
#### 4.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T

จากผลของค่าความเข้มแสง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำในระบบ PV/T ในแต่ละช่วงการวัดนั้น สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วคราว จากสมการที่ 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแต่ละวันที่ทดสอบนั้นสามารถแสดงในรูปของกราฟเทียบกับเวลา ดังในรูปที่ 4.53 ถึง 4.64

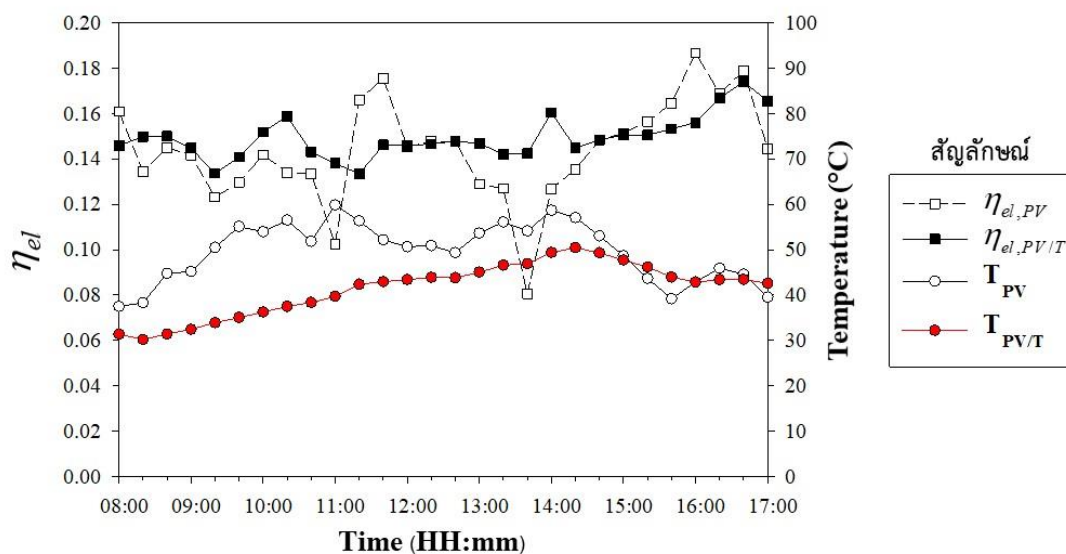
จากกราฟที่แสดง จะเห็นได้ว่าทั้งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนในแต่วันวันที่ทำการทดสอบนั้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยทั่วไปพบว่าตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น.โดยประมาณ แผง PV/T จะมีค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วคราวสูงกว่าแผง PV ที่ 1-2% ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของแผงที่มีค่าต่ำกว่า แต่ในช่วงที่ความเข้มแสงและอุณหภูมิลดลง อาทิ ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไปนั้น แผง PV กลับมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงกว่าแผง PV/T เล็กน้อยเนื่องด้วยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากด้านหลังของแผง PV สู่บรรยากาศที่สูงขึ้น และรวดเร็วกว่าแผง PV/T โดยประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วคราวเฉลี่ยตลอดวันที่ทำการทดลองของแผง PV/T และแผง PV เท่ากับ 13.0-14.9% และ 12.0-14.4% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วคราวของแผง PV/T พบว่า จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่รับความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง แต่ในช่วงท้ายของการทดสอบนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากโมดูลระบายความร้อนยังสามารถระบายความร้อนที่สะสมออกจากแผง PV/T ได้แม้ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำลง โดยประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วคราวเฉลี่ยตลอดวันของแผง PV/T เท่ากับ 39.0-53.0%



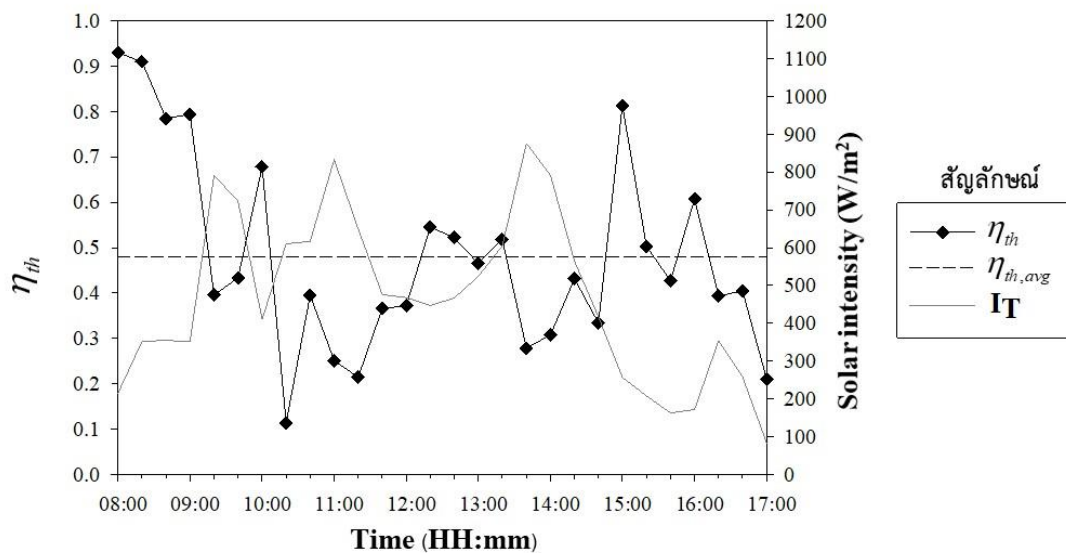
รูปที่ 4.53 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562



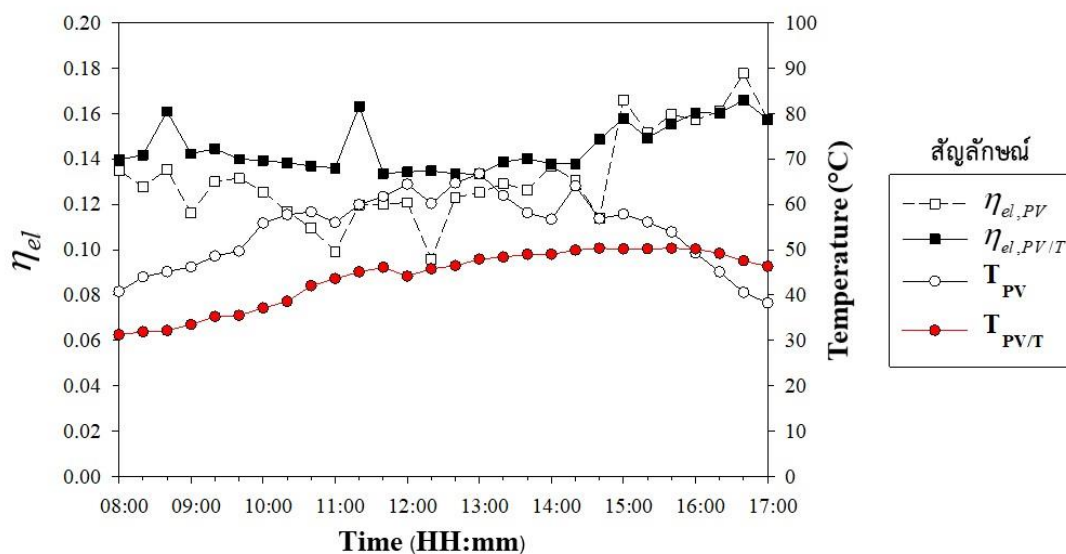
รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562



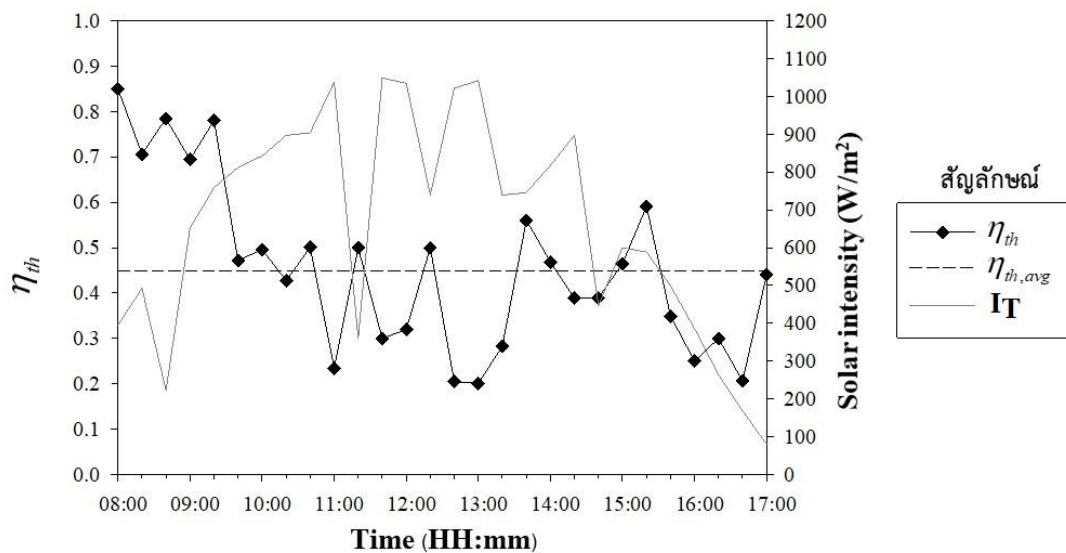
รูปที่ 4.55 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 23 เมษายน 2562



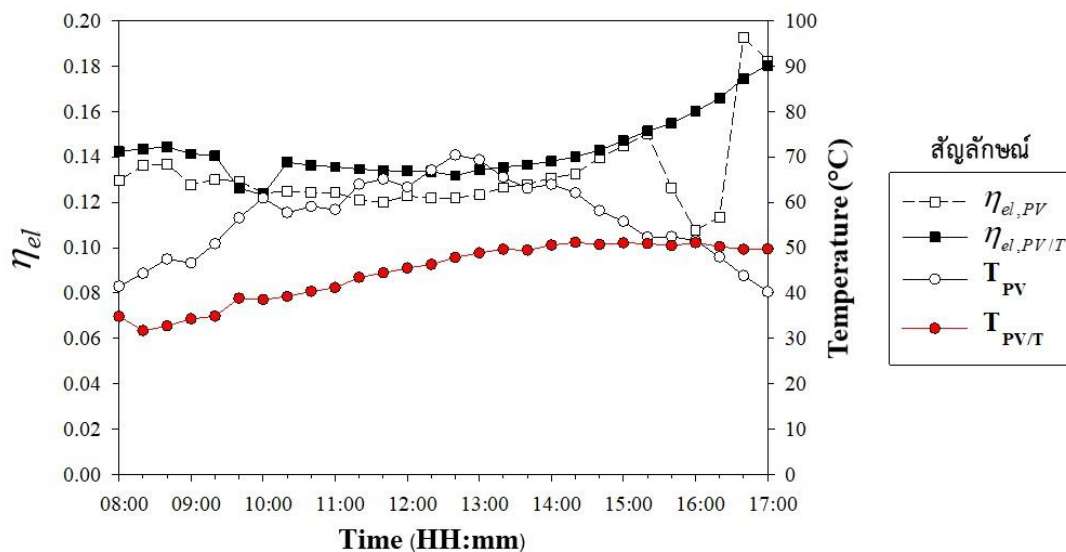
รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 23 เมษายน 2562



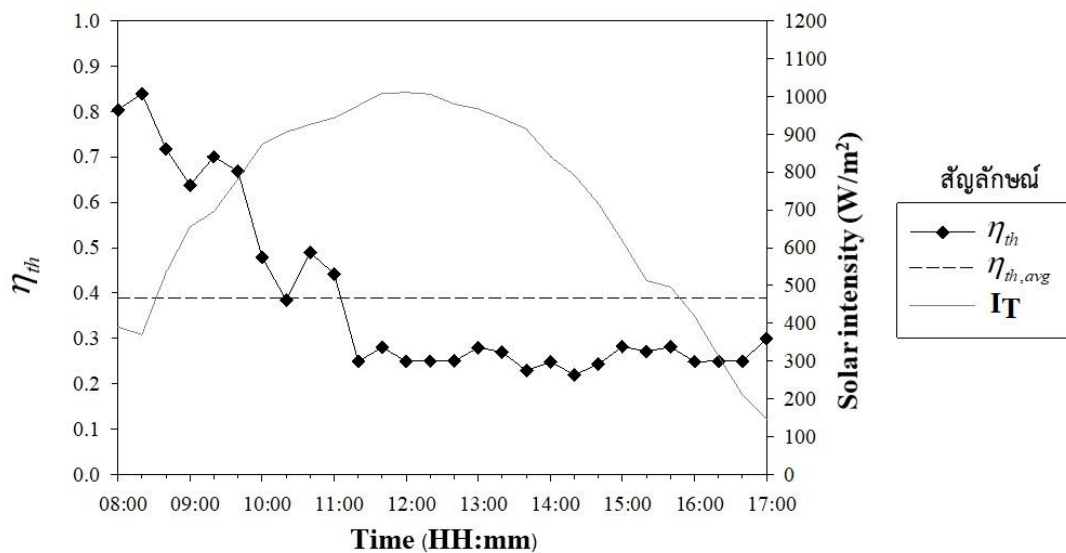
รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562



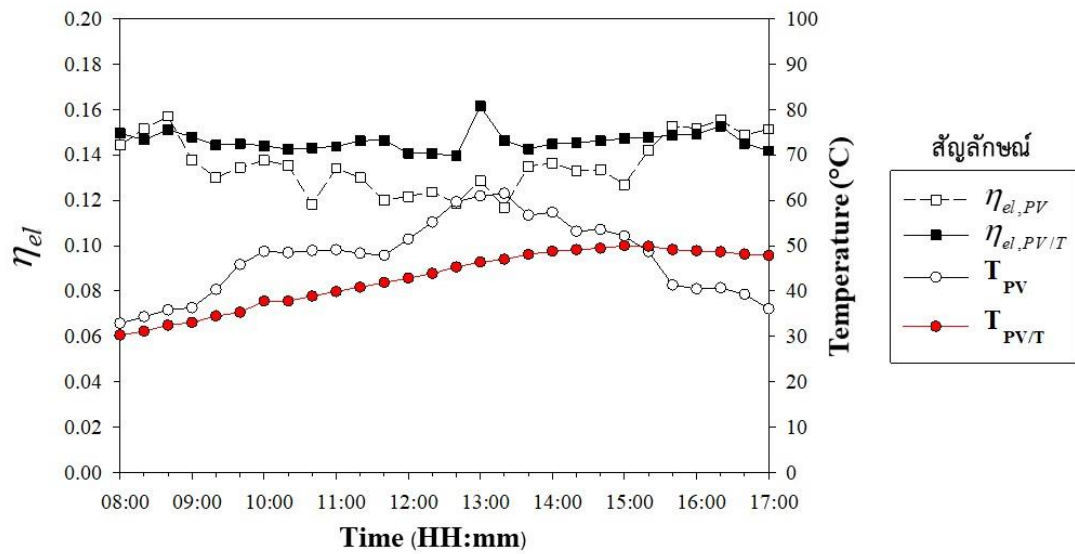
รูปที่ 4.58 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.0 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562



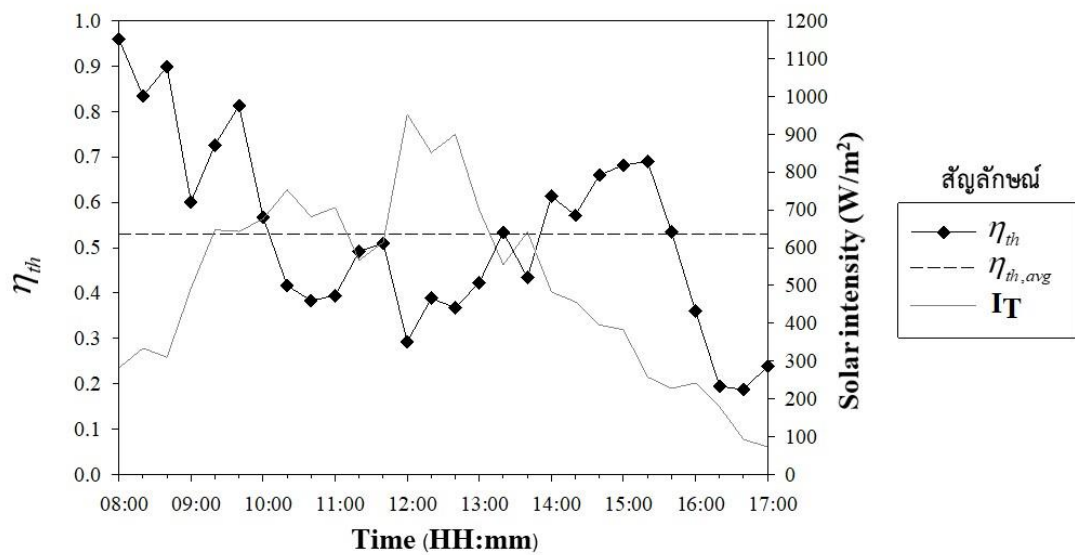
รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 25 เมษายน 2562



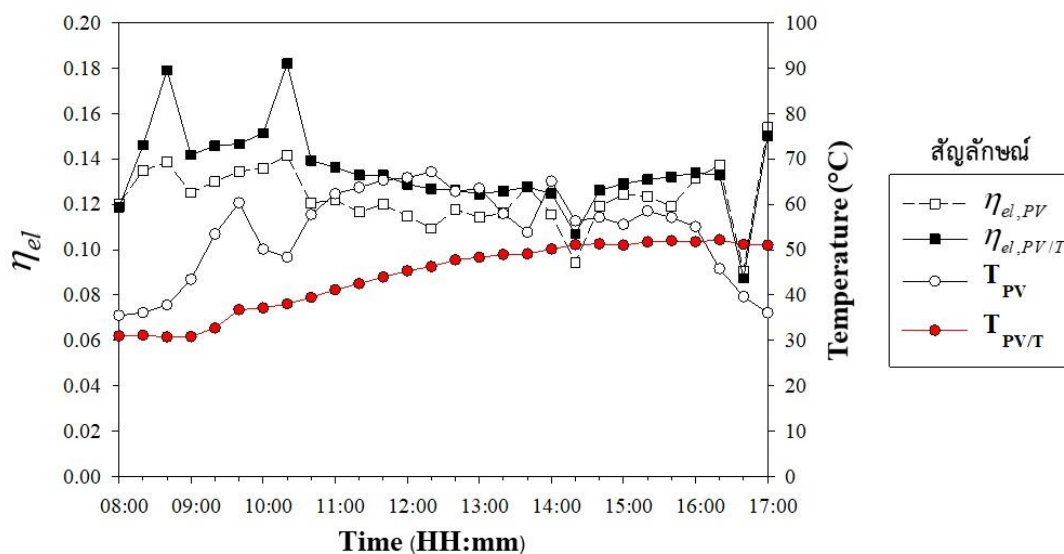
รูปที่ 4.60 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 25 เมษายน 2562



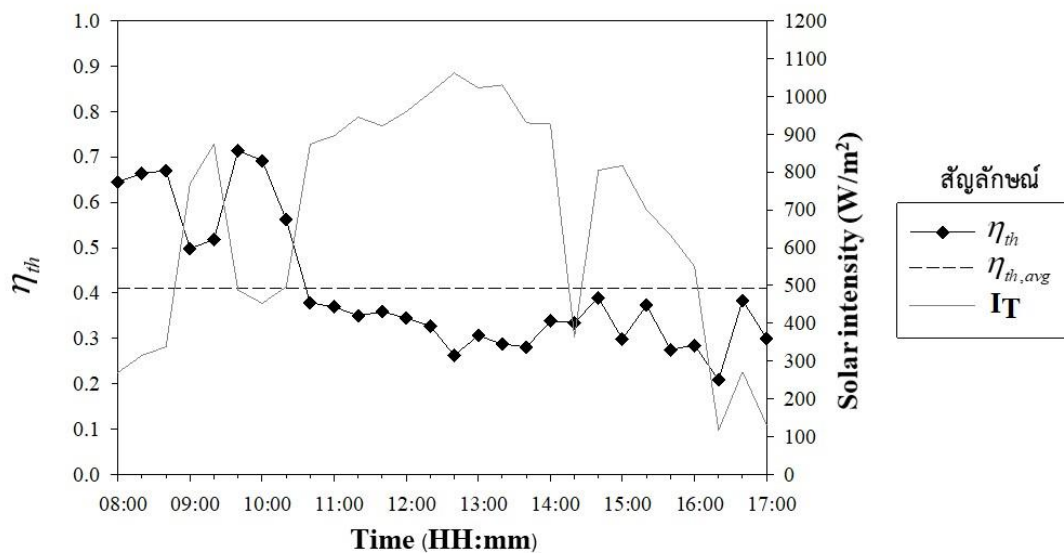
รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 28 เมษายน 2562



รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 28 เมษายน 2562



รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) กับอุณหภูมิของแผง PV และ PV/T กรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562



รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) ของแผง PV/T กับความเข้มแสงกรณีควบคุมอัตราการไหลน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562



ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T และแผง PV

วันที่	$I_{T,avg}$ (W/m <sup>2</sup> )	แผง PV	แผง PV/T		
		$\eta_{el}$ (%)	$m'$ (kg/s)	$\eta_{el}$ (%)	$\eta_{th}$ (%)
22/04/2562	700	13.40	0.5	14.20	44.00
23/04/2562	466	14.40	1.0	14.90	48.00
24/04/2562	660	13.00	1.0	14.50	46.00
25/04/2562	712	13.20	0.5	14.30	39.00
28/04/2562	504	14.00	1.5	14.80	53.00
01/05/2562	678	12.00	1.5	13.00	41.00

จากตารางที่ 4.2 แสดงการสรุปผลการทดสอบแผง PV/T และแผง PV ด้วยค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\eta_{el}$ ) ประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ ( $\eta_{th}$ ) และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ( $I_{T,avg}$ ) ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. ในแต่ละวันที่ทำการทดสอบ กรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s พบว่า ค่าความเข้มแสงในวันทำการทดสอบนั้นมีต่ำส่งผลให้แผง PV มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตั้งแต่ 12.00% ถึง 14.40% สำหรับแผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าอยู่ที่ 13.00% ถึง 14.90% และประสิทธิภาพทางความร้อนตั้งแต่ 39% ถึง 53%

#### 4.3.4 กำลังและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแผง PV/T

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตลอดวันของกำลังไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแผง PV/T เทียบกับแผง PV ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมือนกันทุกประการ โดยกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น คือ ค่าเฉลี่ยตลอดวันของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV/T หักลบกับ ผลรวมของค่าเฉลี่ยตลอดวันของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง PV และกำลังไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการปั๊มน้ำ สำหรับประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T หักลบกับ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าผลิตที่เพิ่มขึ้นของแผง PV/T เมื่อเทียบกับแผง PV

วันที่	แผง PV	แผง PV/T	กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (%)	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (%)
	$P_{avg}$ (W)	$P_{avg}$ (W)		
22/04/2562	181.36	193.67	6.78	0.8
23/04/2562	127.05	136.81	7.68	0.5
24/04/2562	164.20	186.35	13.48	1.5
25/04/2562	182.27	197.76	8.49	1.1
28/04/2562	135.76	144.89	6.72	0.8
01/05/2562	164.58	187.58	13.97	1.0

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 พบว่า แผง PV/T ที่ติดตั้งครบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนนั้น จะมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นสูงกว่าแผง PV แบบทั่วไป 6.78% ถึง 13.97% และมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.5% ถึง 1.5% ซึ่งผลต่างของกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศในวันที่ทดสอบ โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มแสงนั้นมีค่าสูงขึ้น

สำหรับการสรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T ที่ติดตั้งครบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนนั้น ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้ ผลอุณหภูมิของแผง พบว่าโดยทั่วไปแล้วแผง PV/T จะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV แต่ในช่วงที่มีค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศต่ำ อาทิ ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไปนั้น อุณหภูมิของแผง PV จะมีค่าที่ต่ำกว่าเนื่องจากการคายความร้อนสู่บรรยากาศที่รวดเร็วบริเวณด้านหลังของแผง PV โดยที่ค่าความเข้มแสงทั่วไปนั้นแผง PV/T จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ที่ 8 °C ถึง 10 °C สำหรับผลของกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ระบบผลิตได้นั้น พบว่า แผง PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าแผง PV ที่ 6.78% ถึง 13.97% โดยกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์ด้านอุณหภูมิ (Thermal coefficient) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน สำหรับผลด้านพลังงานนั้น แผง PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าแผง PV ที่ 0.14 kWh/day และสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้โดยเฉลี่ยที่ 4.67 kWh/day ส่วนสุดท้ายผลของประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพร่วมกับงานวิจัยของ Salem และคณะ [17] เนื่องจากมีความใกล้เคียงกันในเรื่องของรูปแบบโมดูลระบายความร้อนซึ่งภายในถูกแบ่งเป็นช่องการไหลและติดตั้งบริเวณด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Salem อยู่ที่ 13-14.9% และ 11.1-12.9% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อนของงานวิจัยนี้และของ Salem เท่ากับ 39-53% และ 31.6-47.2% ตามลำดับ

สำหรับขั้นตอนถัดไป การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างแผง PV/T และแผง PV ซึ่งได้พิจารณาจากราคาต้นทุนในการผลิตระบบกับค่าพลังงานสุทธิที่ได้รับจากระบบนั้นๆ รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.5

#### 4.3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผง PV และ PV/T นั้น จะเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมในการนำงานวิจัยนี้ไปใช้จริง ซึ่งจะพิจารณาจากกรณีที่ผู้ติดตั้งมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อน (อุณหภูมิประมาณ 50 °C) ตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบการกิจการโรงแรม รีสอร์ท หรือ โรงพยาบาล ที่ต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากแผง PV/T นี้จะไปแทนที่ค่าใช้จ่ายดังกล่าวได้ โดยในงานวิจัยจะพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยระยะเวลาการคืนทุนของระบบ (Payback period) ซึ่งประกอบด้วย 2 ตัวแปรสำคัญคือ ต้นทุนของระบบและมูลค่าการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากติดตั้งแผง PV/T โดยจะกล่าวดังต่อไปนี้

ต้นทุนของระบบ (First cost) คือ ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ การผลิตและติดตั้งระบบโดยต้นทุนของระบบแผง PV/T ที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 W จำนวน 1 แผง ราคา 7,500 บาท โครงสร้างเหล็กติดตั้งแผง จำนวน 1 ชุด ราคา 3,000 บาท โมดูลระบายความร้อนของแผง จำนวน 9 ตัว ราคา 20,700 บาท ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวน จำนวน 1 ชุด ราคา 13,600 บาทและปั้มน้ำขนาด 1.5 kW จำนวน 1 ตัว ราคา 1,830 บาท รวมต้นทุนของระบบแผง PV/T ทั้งสิ้นเท่ากับ 46,630 บาท สำหรับต้นทุนของระบบแผง PV ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 W จำนวน 1 แผง ราคา 7,500 บาท โครงสร้างเหล็กติดตั้งแผง จำนวน 1 ชุด ราคา 3,000 บาท รวมต้นทุนของระบบแผง PV ทั้งสิ้นเท่ากับ 10,500 บาท โดยต้นทุนของระบบผลิตพลังงานทั้ง 2 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนของระบบผลิตพลังงาน

อุปกรณ์ในระบบผลิตพลังงาน	ต้นทุนแผง PV (บาท)	ต้นทุนแผง PV/T (บาท)
1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 300 W	7,500	7,500
2. โครงสร้างเหล็กติดตั้งแผง	3,000	3,000
3. โมดูลระบายความร้อนของแผง	-	20,700
4. ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวน	-	13,600
5. ปั้มน้ำขนาด 1.5 kW	-	1,830
รวมต้นทุนระบบทั้งสิ้น	10,500	46,630

มูลค่าการลดการใช้พลังงาน (Cost saving) คือ การลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าต่อปีที่ได้รับเมื่อติดตั้งแผง PV หรือแผง PV/T โดยมูลค่าการลดการใช้พลังงานนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเนื่องจากความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของแผง PV และแผง PV/T และการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำน้ำร้อน (อุณหภูมิ 50 °C) ที่ได้รับจากโมดูลระบายความร้อนของแผง PV/T สำหรับการคำนวณการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งได้จากการผลิตไฟฟ้าด้วยแผง PV และ PV/T นั้นจะใช้ข้อมูลจากการทดสอบวันที่ 23 เมษายน 2562 เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV และ PV/T สูงสุดและใช้อัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วยซึ่งพิจารณาตามประเภทบ้านที่อยู่อาศัย 2 กรณี คือ ประเภทที่ 1.1 กรณีบ้านเรือนที่อยู่อาศัยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน และประเภทที่ 1.2 คือ กรณีบ้านเรือนที่อยู่อาศัยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ซึ่งจะพิจารณาในช่วงที่ 151-400 หน่วยต่อเดือน (อ้างอิงจาก [www.pea.co.th](http://www.pea.co.th))

พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{el} = (P - 0.8P_{pump}) \times t \quad (4.1)$$

โดยที่  $E_{el}$  คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T ต่อวันเมื่อหักกลับพลังงานในการปั๊มน้ำออกแล้ว (J/day)

$P$  คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T

$P_{pump}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการปั๊มน้ำของระบบแผง PV/T ซึ่งคำนวณได้จาก

$$P_{pump} = \dot{Q} \times \Delta P \quad (4.2)$$

$\dot{Q}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำในระบบ PV/T ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\Delta P$  คือ ค่าการสูญเสียความดันของน้ำในระบบแผง PV/T ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

$t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (s)

สำหรับมูลค่าการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนนั้น สามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ PV/T ที่มีความสามารถในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิ 50 °C (จากอุณหภูมิน้ำทั่วไปที่ 30 °C) ได้ในปริมาณ 200 L ต่อวัน โดยค่าพลังงานความร้อนที่แผง PV/T ผลิตได้นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{th} = mC_p \Delta T \quad (4.3)$$

โดยที่  $E_{th}$  คือ พลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากแผง PV/T ต่อวัน (J/day)

$m$  คือ มวลของน้ำที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิ (200 kg)

$\Delta T$  คือ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในระบบแผง PV/T ในระยะเวลา 1 วัน

จากในการผลิตน้ำร้อนโดยทั่วไปนั้นจะใช้เครื่องทำน้ำอุ่นหรือฮีตเตอร์ (Heater) เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำ และในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ผู้ติดตั้งมีความต้องการพลังงานทั้ง 2 รูปแบบนี้ ดังนั้นพลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{Net} = E_{el} + E_{th} \quad (4.4)$$

โดยที่  $E_{Net}$  คือ พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อวัน (J/day)

$E_{el}$  คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่แผง PV, PV/T ผลิตได้ต่อวัน (J/day)

$E_{th}$  คือ พลังงานความร้อนที่แผง PV/T ผลิตได้ต่อวัน (J/day)

และเนื่องจากในการคำนวณมูลค่าการลดการใช้ไฟฟ้านั้น ค่าพลังงาน 3.6 MJ จะเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 1 unit (อ้างอิงจาก [www.egat.co.th](http://www.egat.co.th)) ซึ่งถูกพิจารณาเป็นรายปี ดังนั้นหากพิจารณาการผลิตพลังงานของแผง PV และ PV/T เพื่อทดแทนการใช้ไฟฟ้าโดยสมมติฐานว่ามีการใช้ระบบผลิตพลังงานทุกวันและประสิทธิภาพของแผงมีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นพลังงานสุทธิที่ทั้ง 2 ระบบผลิตได้ต่อปีสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{Net/yaer} = \frac{E_{Net} \times t}{3.6 \times 10^6} \quad (4.5)$$

โดย  $E_{Net/yaer}$  คือ พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อปี (unit)

$E_{Net}$  คือ พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อวัน (J/day)

$t$  คือ ระยะเวลาที่ระบบทำงาน (365 day)

**ตารางที่ 4.5** สรุปผลค่าพลังงานที่ใช้ในการคำนวณมูลค่าการลดการใช้ไฟฟ้าของแผง PV และ PV/T

ระบบผลิตพลังงาน	แผง PV	แผง PV/T
พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ต่อวัน (J/day)	4,193,969	4,554,255
พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่อวัน (J/day)	-	16,720,000
พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อวัน (J/day)	4,193,969	21,274,255
พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อปี (unit)	425.22	2,156.97

สำหรับระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตพลังงานทั้ง 2 นั้นจะพิจารณาแบบระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย คือ ต้นทุนของระบบผลิตพลังงานและอัตราค่าไฟฟ้าฐานมีค่าคงที่ ไม่คิดค่าไฟฟ้าผันแปร และภาษีมูลค่าเพิ่ม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SPP = \frac{\text{First cost}}{\text{Cost saving}} \quad (4.6)$$

โดยที่ *SPP* (Simple Payback period) คือ ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตพลังงาน (Year)  
*First cost* คือ ต้นทุนของระบบผลิตพลังงาน (Baht)  
*Cost saving* คือ มูลค่าการลดการใช้ไฟฟ้าจริงในแต่ละปี ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของพลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้ต่อปีกับอัตราค่าไฟฟ้า (Baht/year)

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาคืนทุนของแผง PV และ PV/T จากประเภทการใช้ไฟฟ้าที่ 1.1 และ 1.2

ประเภทการใช้ไฟฟ้า			ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (Year)	
	หน่วยที่	หน่วยละ (Baht)	แผง PV	แผง PV/T
1.1	1-15	2.3488	10.5	9.2
	16-25	2.9882	8.3	7.2
	26-35	3.2405	7.6	6.7
	36-100	3.6237	6.8	6.0
	101-150	3.7171	6.6	5.8
	151-400	4.2218	5.8	5.1
	401 เป็นต้นไป	4.4217	5.6	4.9
	1.2	1-150	3.2484	7.6
151-400		4.2218	5.8	5.1
401 เป็นต้นไป		4.4217	5.6	4.9

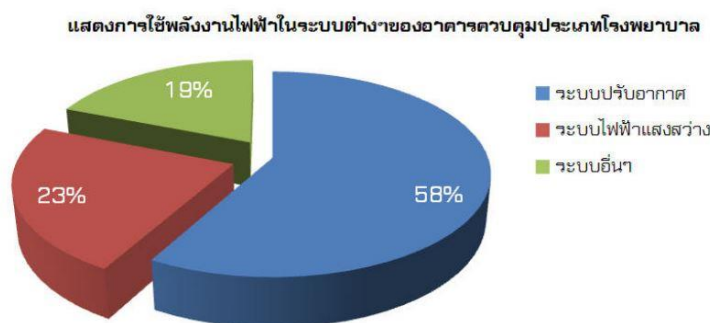
จากตารางที่ 4.6 หากพิจารณาการใช้ไฟฟ้าตามประเภทบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ประเภทที่ 1.1 และ 1.2 นั้นจะเห็นได้ว่าแผง PV/T มีระยะเวลาคืนทุนที่ 5.8 ปี และ 5.1 ปี ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผง PV ที่ใช้ในการอ้างอิงนั้นพบว่าแผง PV/T จะมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าเกือบ 1 ปี สำหรับหัวข้อสุดท้ายเป็นการเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แผง PV/T ดังจะกล่าวต่อไปนี้

#### 4.3.6 แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากแผง PV/T

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในเรื่องของการประยุกต์นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ทั้งทางไฟฟ้าและทางความร้อน ทำให้ทราบได้ว่าการผลิตพลังงานทั้ง 2 รูปแบบ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานในรูปแบบที่ต้องการ โดยจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและใช้โมดูลระบายความร้อนรังสีอาทิตย์ในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งหากมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสองรูปแบบนี้พร้อมกันจะต้องติดตั้งทั้งสองระบบอันเป็นการสิ้นเปลืองทั้งด้านงบประมาณและพื้นที่ใช้งานเป็นอย่างมาก ดังนั้นระบบแผง PV/T จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับปัญหา เนื่องจากสามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนที่มาจากโมดูลระบายความร้อนที่ติดตั้งด้านหลังของแผง ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ลดงบประมาณในการลงทุนลดพื้นที่ที่ใช้ในติดตั้งและยังช่วยลดอัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเปรียบเทียบกับกับติดตั้งแบบแยกของทั้ง 2 ระบบ

สถานที่ประกอบการที่สามารถนำแผง PV/T ที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างเช่น โรงแรม รีสอร์ทหรือโรงพยาบาล ซึ่งโดยปกติสถานที่เหล่านี้ล้วนมีความต้องการที่จะใช้ทั้งไฟฟ้าและน้ำร้อนในการประกอบกิจกรรมอยู่แล้ว โดยในที่นี้จะขอพิจารณาในเรื่องของรายละเอียดการใช้พลังงานในอาคารควบคุมประเภทโรงพยาบาล ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่ที่มีลักษณะแตกต่างกันสามารถจำแนกการใช้พลังงานเป็นระบบดังนี้คือ ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบที่ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนและระบบทำความร้อน

โดยระบบดังกล่าวใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนเป็นหลัก พบว่าการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมากถึงร้อยละ 58.3 การใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างร้อยละ 22.5 และการใช้พลังงานส่วนอื่นๆอีกร้อยละ 19.2 ตามลำดับ แผนภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารควบคุมประเภทโรงพยาบาล ดังแสดงในรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 แผนภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบต่างๆของอาคารควบคุมประเภทโรงพยาบาล [27]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือ แผง PV/T โดยใช้เทคนิคการติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนซึ่งในการทดสอบได้ประเมิน อุณหภูมิของแผง ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อนและพลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้เปรียบเทียบกับระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั่วไป หรือ แผง PV กับ แผง PV/T ที่ติดตั้งครีบบและช่องการไหลภายในโมดูลระบายความร้อน ในการทดสอบนั้นได้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบแผง PV/T ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ทดสอบที่การใช้งานแบบทั่วไป (Normal climate conditions) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบสร้างความปั่นป่วน เพื่อหารูปแบบครีบบและลักษณะการติดตั้งครีบบที่ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดซึ่งจะถูกนำมาติดตั้งภายในตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T ต่อไป จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) จากการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบได้ข้อสรุปว่า การติดตั้งครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด โดยเฉพาะการติดตั้งในช่องการไหลแบบวกกลับและจากการศึกษาลักษณะการไหลด้วยการจำลองในโปรแกรม ANSYS Ver.15 (Fluent) พบว่า การไหลของน้ำผ่านครีบบรูปตัววีจะสร้างคู่อการไหลวนขึ้นภายในหน้าตัดของช่องการไหล ซึ่งการไหลวนนี้จะเหนี่ยวนำของไหลให้ไหลเกาะติดพื้นผิวทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นครีบบรูปตัววีแบบต่อเนื่องมุม 45° และช่องการไหลแบบวกกลับจึงถูกนำไปติดตั้งในตัวเก็บความร้อนของแผง PV/T

(2) อุณหภูมิของแผง PV/T จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T มีค่าสูงกว่าแผง PV ซึ่งทั่วไปในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 15.00 น. แผง PV/T จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ที่ 8-10 °C แต่ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงมีค่าต่ำ อาทิ ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของแผง PV จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าแผง PV/T เนื่องจากความสามารถในการคายความร้อนบริเวณด้านหลังแผงที่สูง แต่ไม่ได้มีผลต่อกำลังไฟฟ้ามานักเนื่องจากเป็นช่วงที่มีค่าความเข้มแสงที่ต่ำ



(3) แผง PV/T มีกำลังไฟฟ้าผลิตสูงกว่าแผง PV ที่ 6.8-14.0% เนื่องจากอุณหภูมิของแผงที่ต่ำกว่า ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Thermal coefficient) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนที่นำมาทดสอบเช่นกัน สำหรับการผลิตพลังงานของแผง PV/T พบว่า สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าแผง PV ที่ 0.14 kWh/day และสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้ที่ 4.67 kW/day

(4) จากการคำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันพบว่า แผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงเฉลี่ยที่ 13.0-14.9% และประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงเฉลี่ยที่ 39.0-53.0% ขณะที่แผง PV มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงเฉลี่ยที่ 12.0-14.4% โดยค่าประสิทธิภาพนี้จะขึ้นกับความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศในวันที่ทำการทดสอบด้วยเช่นกัน

(5) จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยระยะเวลาคืนทุนพบว่า เมื่อพิจารณาการใช้ไฟฟ้าตามประเภทบ้านเรือนที่อยู่อาศัยประเภทที่ 1.1 และ 1.2 แผง PV/T จะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 5.8 และ 5.1 ปี ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบกับแผง PV ที่ใช้ในการอ้างอิงการทดสอบนั้นพบว่า แผง PV/T จะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่าแผง PV ประมาณ 8 เดือน โดยสมมติว่าผู้ติดตั้งมีความต้องการใช้ทั้งกระแสไฟฟ้าและน้ำร้อนจากระบบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแผงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือ แผง PV/T ที่ติดตั้งครีบบเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนภายในตัวเก็บความร้อน ซึ่งในการศึกษาขั้นตอนต่อไปอาจต้องปรับปรุงและเพิ่มเติมขอบเขต ดังนี้

- (1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะพิทต่อความสูงของครีบบ ( $p/e$ ) ที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อน
- (2) ศึกษาประสิทธิภาพของแผง PV และแผง PV/T ในกรณีที่ควบคุมความเข้มแสง ( $I_T$ ) ในการทดสอบ
- (3) ศึกษาแนวทางการขยายกำลังการผลิตและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าและความร้อนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริง
- (4) ศึกษาแนวทางการผลิตและติดตั้งครีบบในตัวเก็บความร้อนอย่างง่าย เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มโอกาสต่อยอดงานวิจัย

## บรรณานุกรม

- [1] สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย (Energy Situation), ออนไลน์ : [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42079](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42079)
- [2] ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้า, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
- [3] คู่มือการพัฒนาและผลิตพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, pp. 1
- [4] โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2560, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, pp. 140-145
- [5] คู่มือการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, pp. 1-11
- [6] คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, pp. 6-19
- [7] E.M.G.Rodrigues, R. Melicio, V.M.F. Mendes and J.P.S. Catalao, 2011, "Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ11).
- [8] อรรถกร อาสนคำอิสระพงศ์ กันธิยะ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2015, "การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง", วรสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, pp. 87-93
- [9] PV/T, ออนไลน์: [http://www.tessolarwater.com/index\\_en.html?zeuspv-t.html&2](http://www.tessolarwater.com/index_en.html?zeuspv-t.html&2)
- [10] Han, J.C., (2004), "Recent studies in turbine blade cooling" International Journal of Rotating Machinery, Vol. 10(6), pp. 443-457
- [11] Stefan Krauter, 2004, "Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 82, pp. 131-137
- [12] M.Abdolzadeh, M.Ameri a, 2009, "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells", Renewable Energy, Vol. 34, pp. 91-96

- [13] S.Nizetic, D.Coko, A.Yadav, F.Grubic-Cabo, 2016, “Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, pp. 287-296
- [14] นิคม ผึ้งคำ, 2008, “การเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยระบบหล่อเย็น”, สาขาวิชาฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [15] มณฑนา รังสิโยภาส มัลลิกา คันทะมุล นิโบล ธาราสมบัติ และ วรรณต์พงษ์ วัชรพงศ์วิช, 2016, “การประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, จังหวัดสงขลา
- [15] T.T. Chow, 2010, “A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology”, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 365-379
- [17] Bahaidarah H., Abdul S., Gandhidasan P.and Rehman S., 2013, “Performance evaluation of a PV (Photovoltaic) modul by back surface water cooling for hot climatic condition”, *Energy*, Vol. 59, pp. 445-453.
- [18] M.R. Salem, R.K. Ali, K.M. Elshazly, 2017, “Experimental investigation of the performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar system using aluminium cooling plate with straight and helical channels”, *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 147-156
- [19] Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein. R.J., 1971, “Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601-617
- [20] หนังสือ Gas Turbine Heat transfer and cooling Technology 2nd Edition ชื่อผู้เขียน Je-Chin Han, Sandip Dutta และ Srinath Ekkeed สำนักพิมพ์ Taylor & Francis Group USA, pp. 372-375
- [21] Han, J.C., and Zhang, Y.M., (1992), “High performance heat transfer ducts with parallel broken and v-shaped broken ribs.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 35(2), pp. 513-523.
- [22] Neil Vincent, 2014, Solar Photovoltaic Panel Cooling System and Method, United States Patent No. 0060620A1
- [23] Fernando Fernandez, 2015, Cooling Method and System for Photovoltaic Solar Panels, United States Patent No. 0357969A1
- [24] Porponth Sichanugrist, 2008, Photovoltaic Thermal (PVT) Collector, United States Patent No. 0011289A1

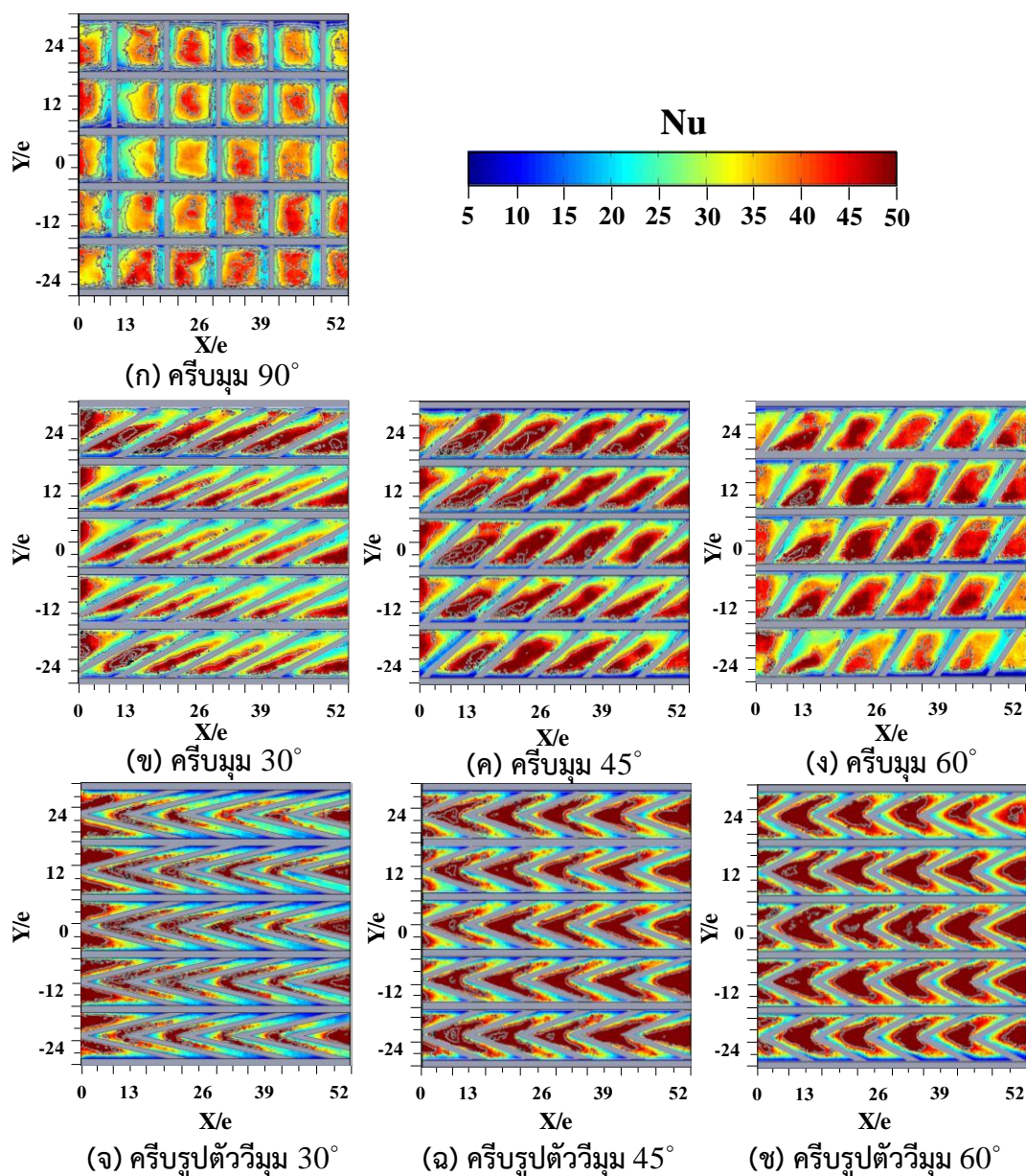
- [25] Kristain Harley Hansen, 2013, Fully Integrated Solar Absorber, Danmark Patent No. 177468 B1
- [26] Liu Zhongbing, 2011, Solar photovoltaic thermoelectric heating module and photovoltaic thermoelectric hot water system, China Patent No. 102208475 A
- [27] โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอาคารต่างๆ (SEC), กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, pp. 1-5

ภาคผนวก ก.

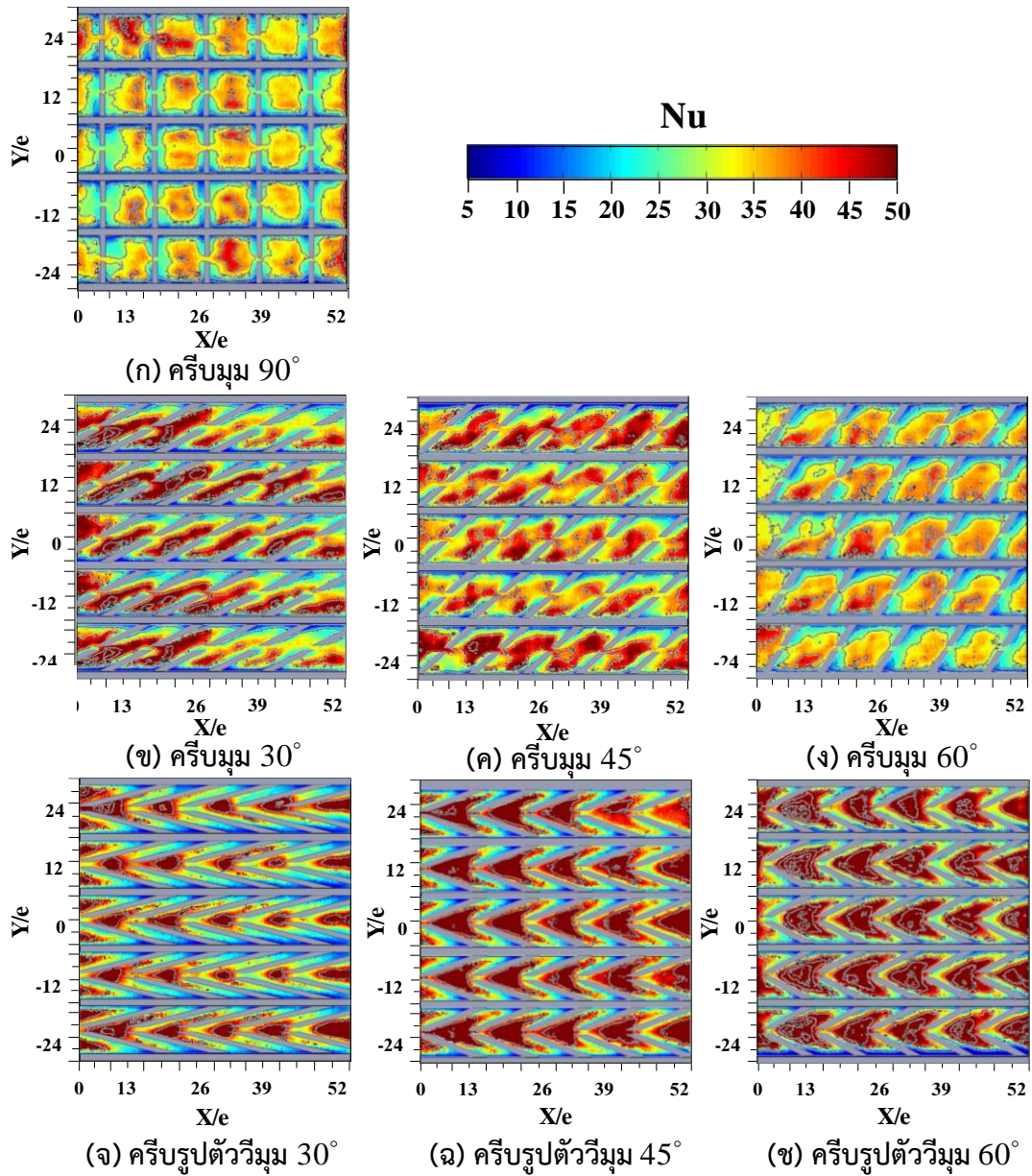
ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลน้ำ 8 และ 12 LPM

### 1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนานที่ 8 และ 12 LPM

รูปที่ ก.1 ถึง ก.4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนท่อและแบบแตกตามลำดับ โดยเงื่อนไขที่อัตราการไหลน้ำที่ 8 ( $Re = 800$ ) และ 12 LPM ( $Re = 1,200$ ) ในช่องการไหลแบบขนาน

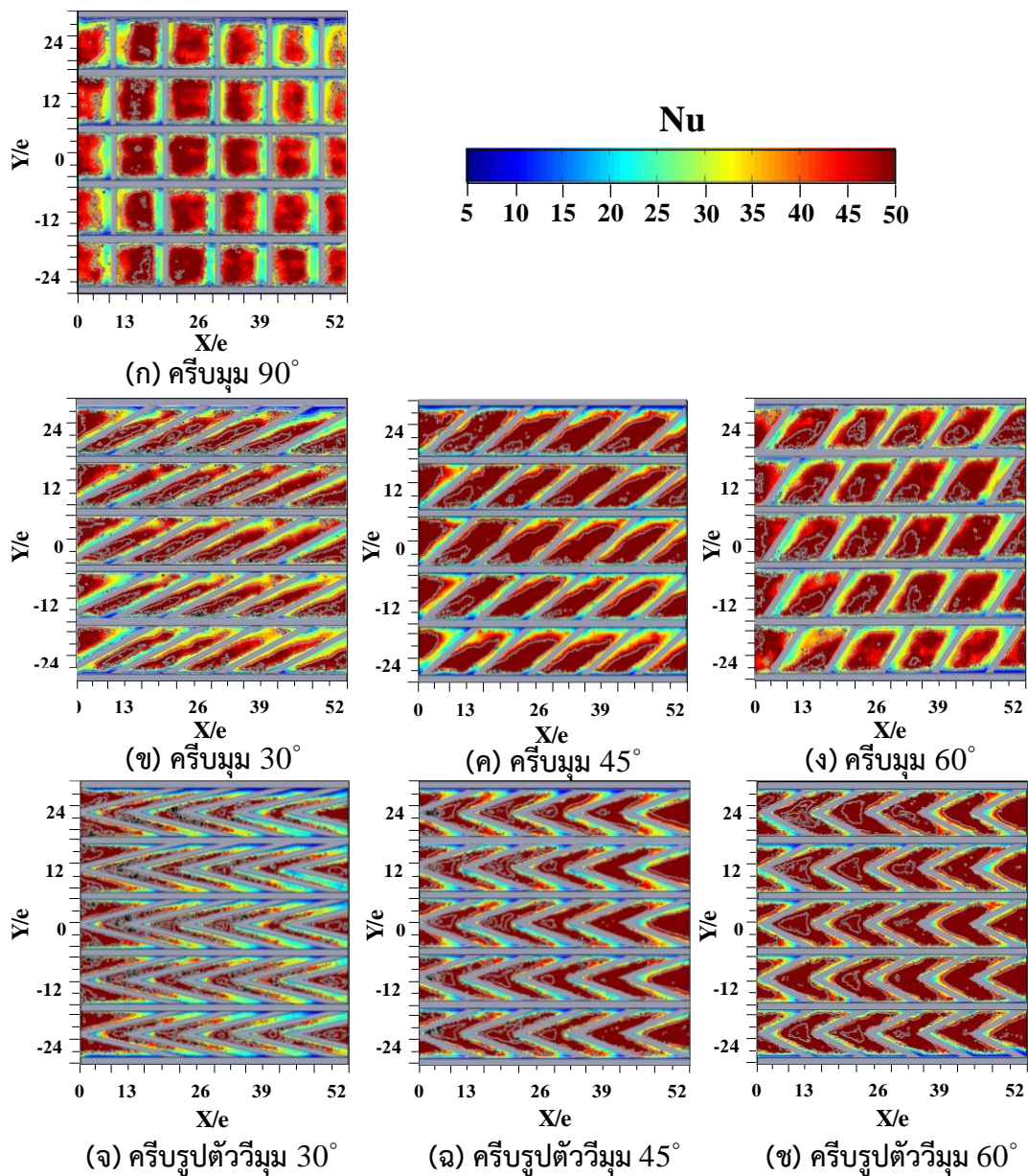


รูปที่ ก.1 การกระจายของค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนท่อในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบนท่อที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ )



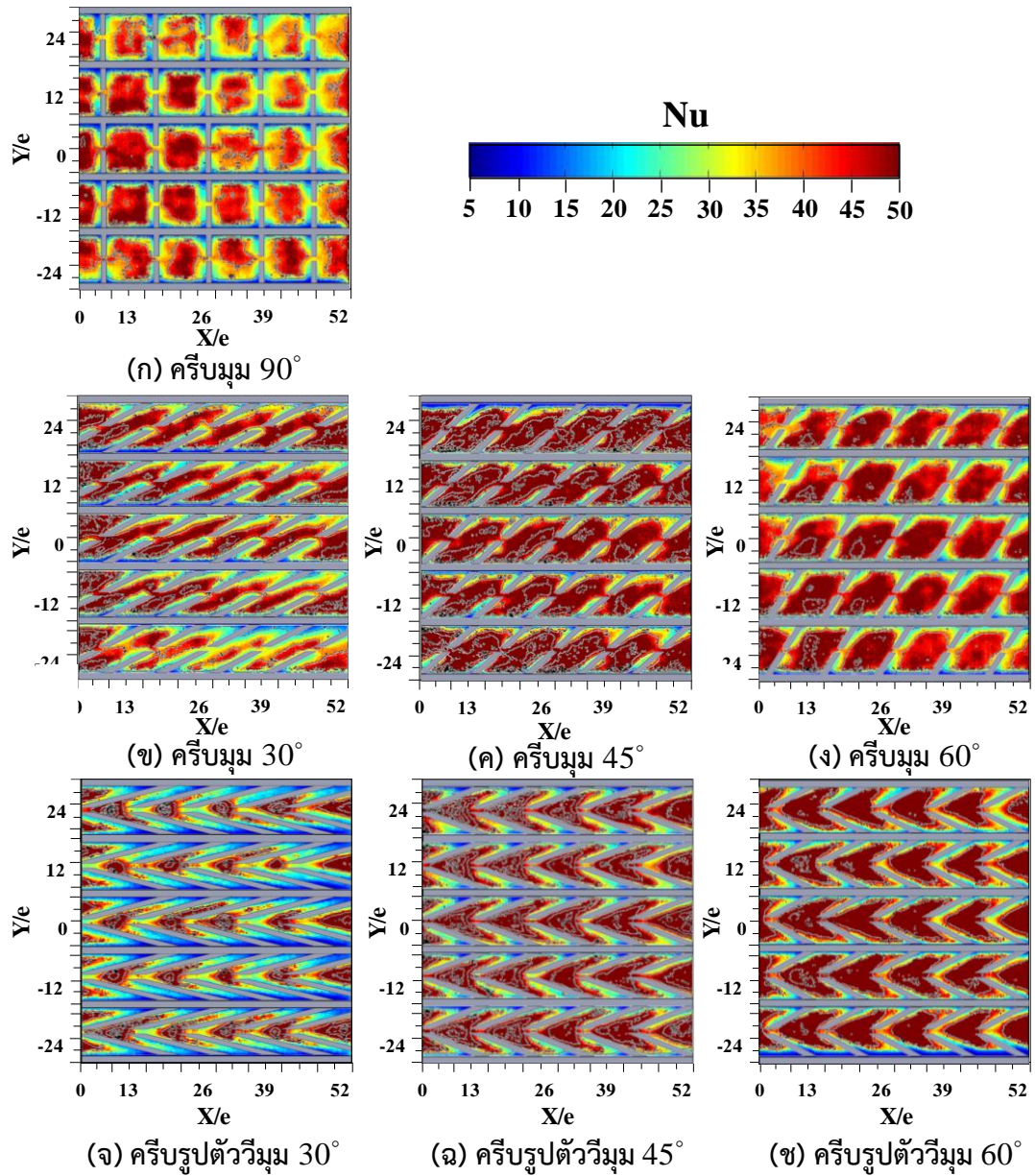
รูปที่ ก.2 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ  
 ในช่วงการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ )





รูปที่ ก.3 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ  
 ในช่องทางไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )

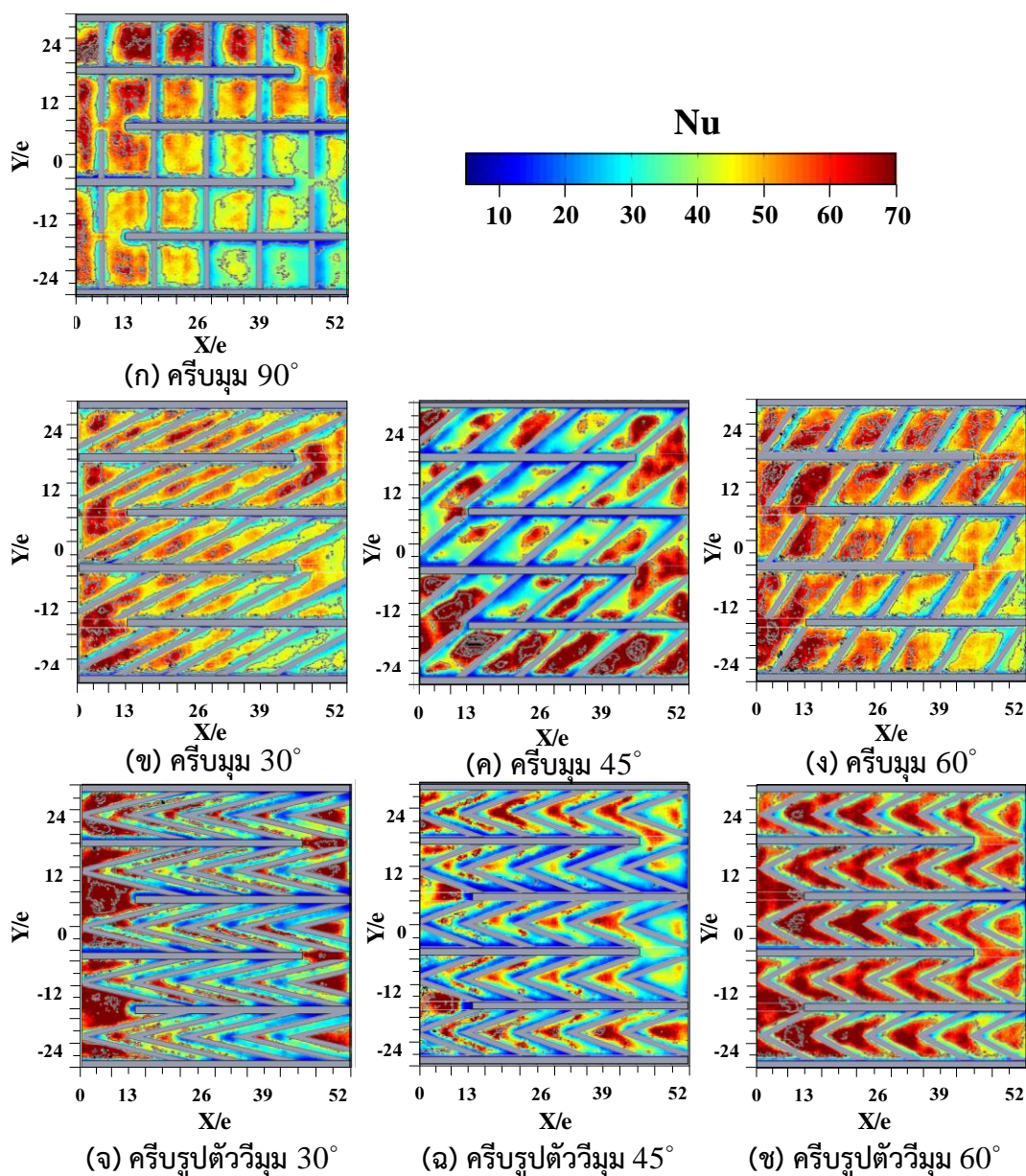




รูปที่ ก.4 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบน  
ในช่องการไหลแบบขนาน กรณีครีบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )

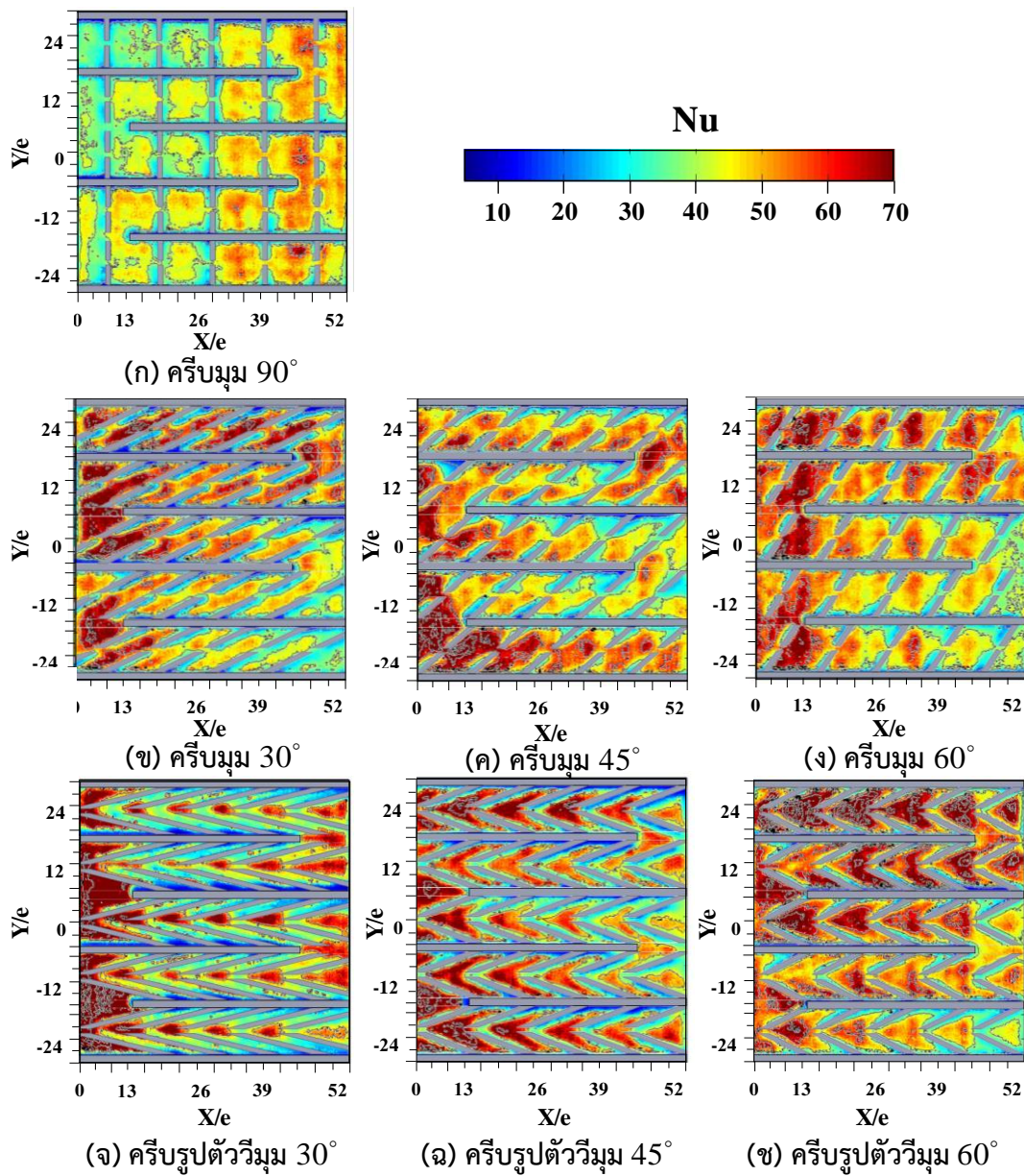
## 2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบวกกลับ

รูปที่ ก.5 ถึง ก.8 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่าตัวเลขไนต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบอกในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลของน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ ) และ 12 LPM ( $Re = 6,000$ ) ตามลำดับ

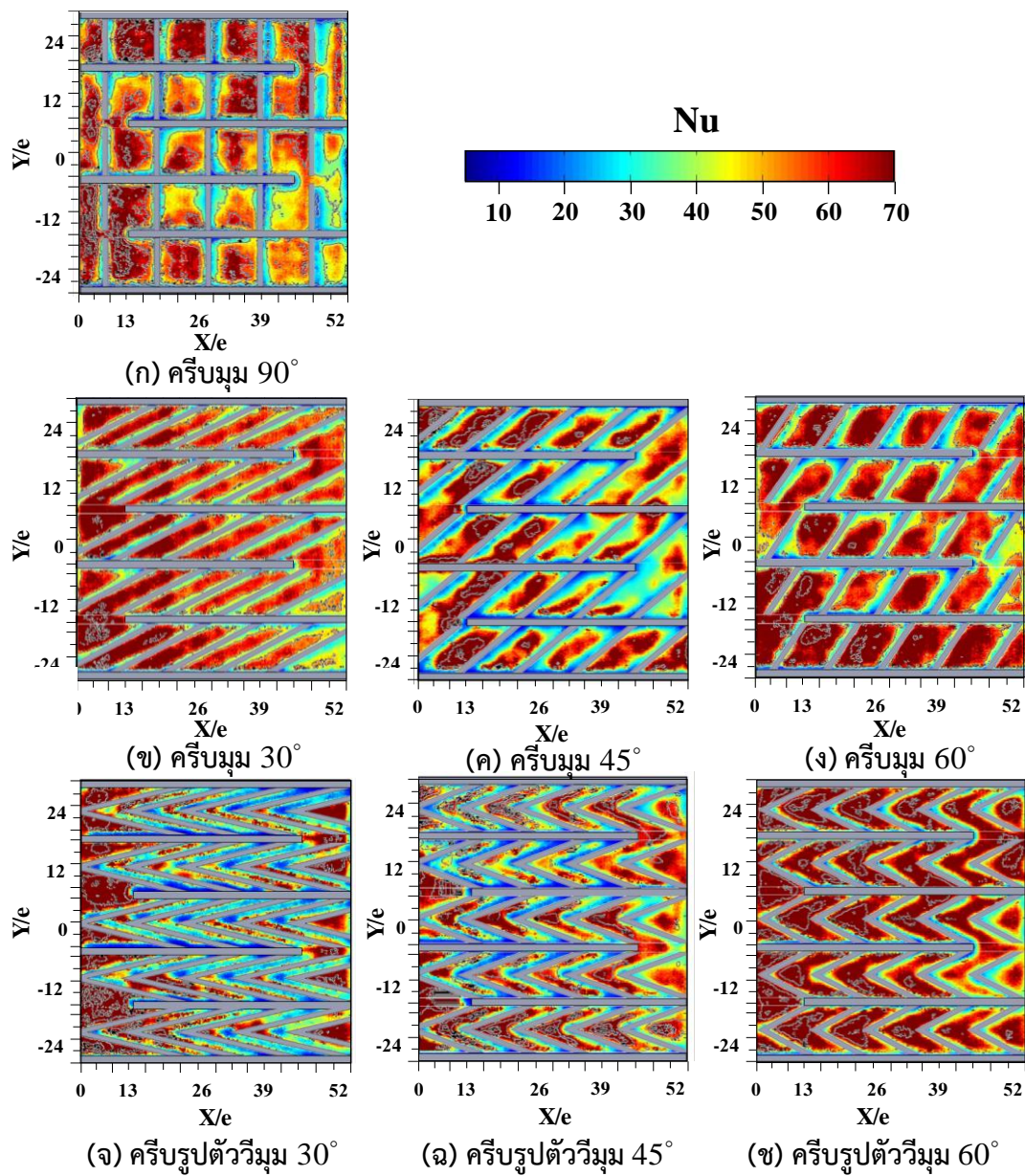


รูปที่ ก.5 การกระจายของค่าตัวเลขไนต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบอกในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบอกแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ )



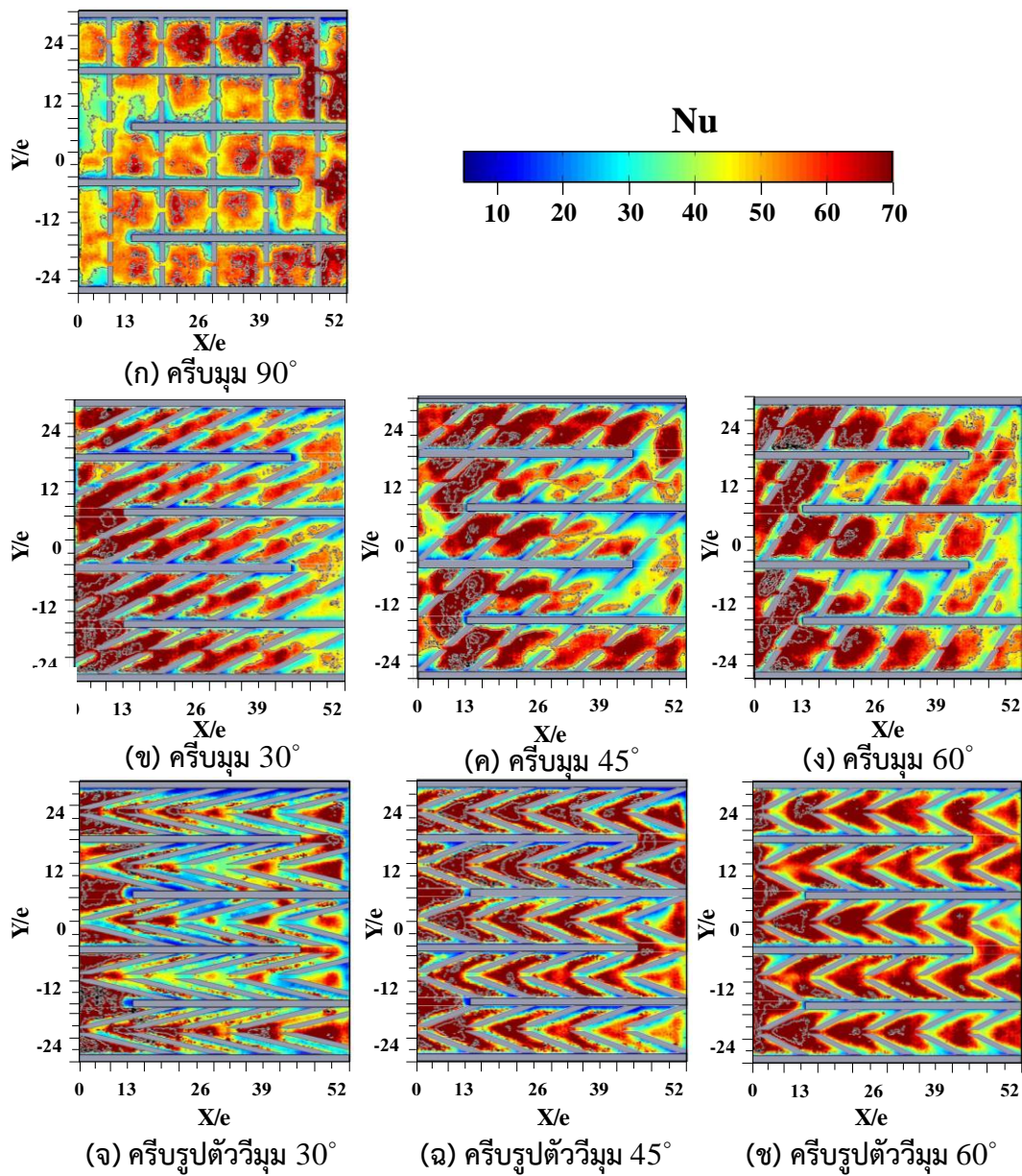


รูปที่ 6.6 การกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบ  
ในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ )



รูปที่ ก.7 การกระจายของค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบ  
 ในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบวมต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )

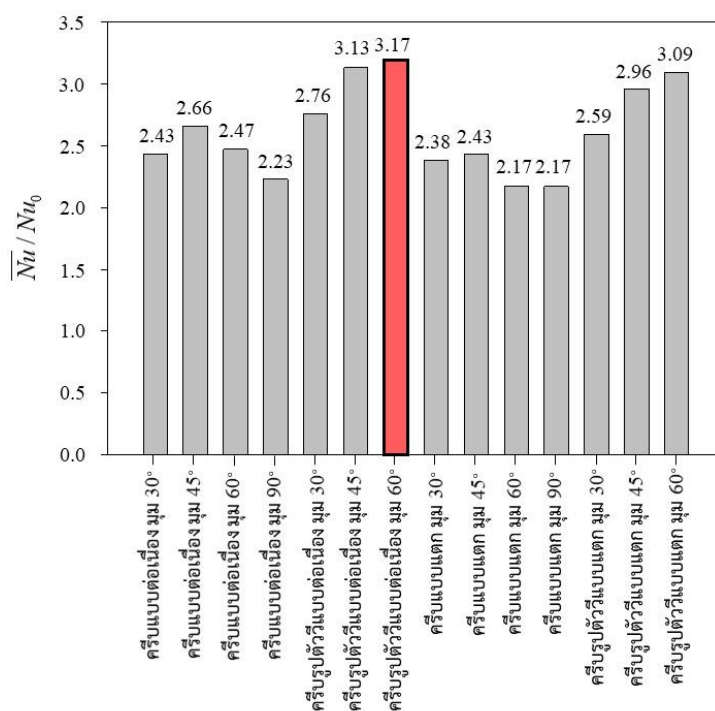




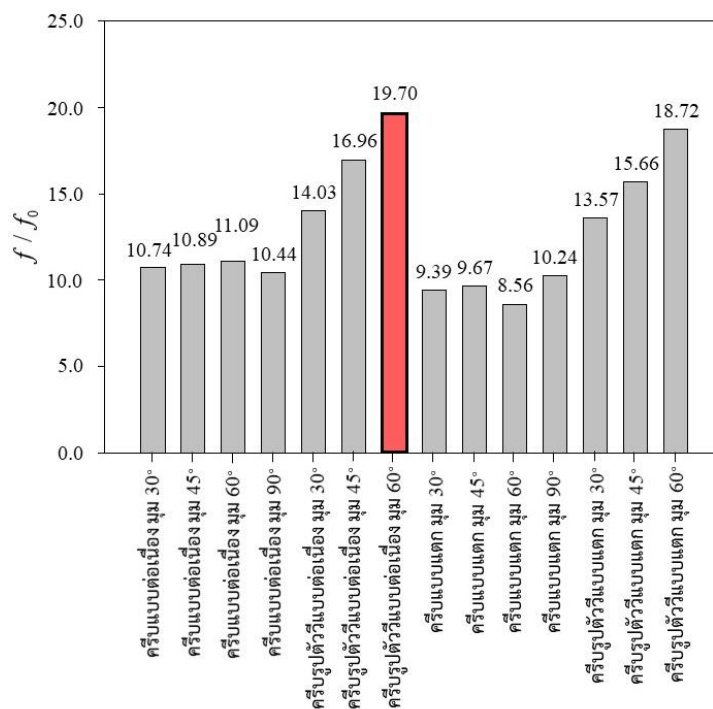
รูปที่ ก.8 การกระจายของค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบวม  
 ในช่องการไหลแบบวกกลับ กรณีครีบบวมแบบแตก ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )

### 3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน

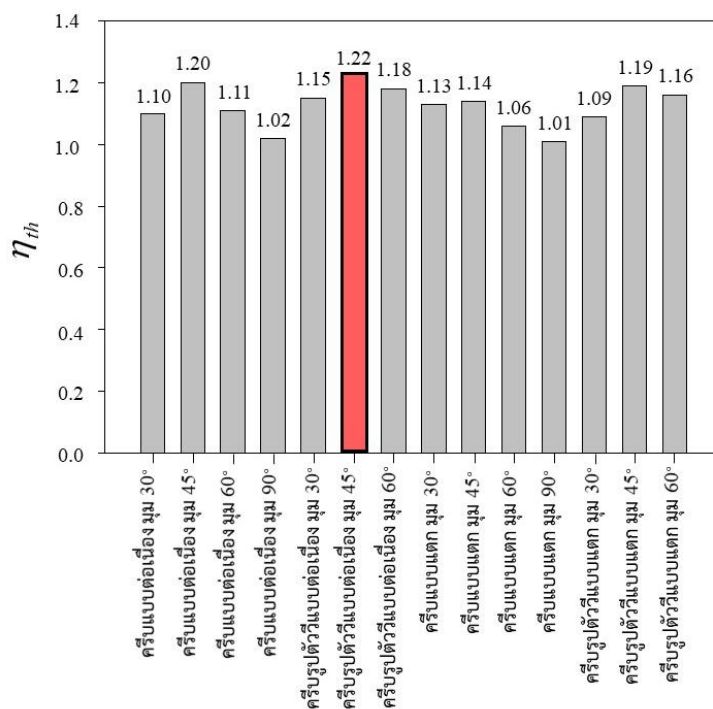
รูปที่ ก.9 ถึง ก.14 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน ( $\overline{Nu} / Nu_0$ ) อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนานเทียบกับกรณีพื้นผิวเรียบ ( $f / f_0$ ) และสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนานตามลำดับ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ ) และ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )



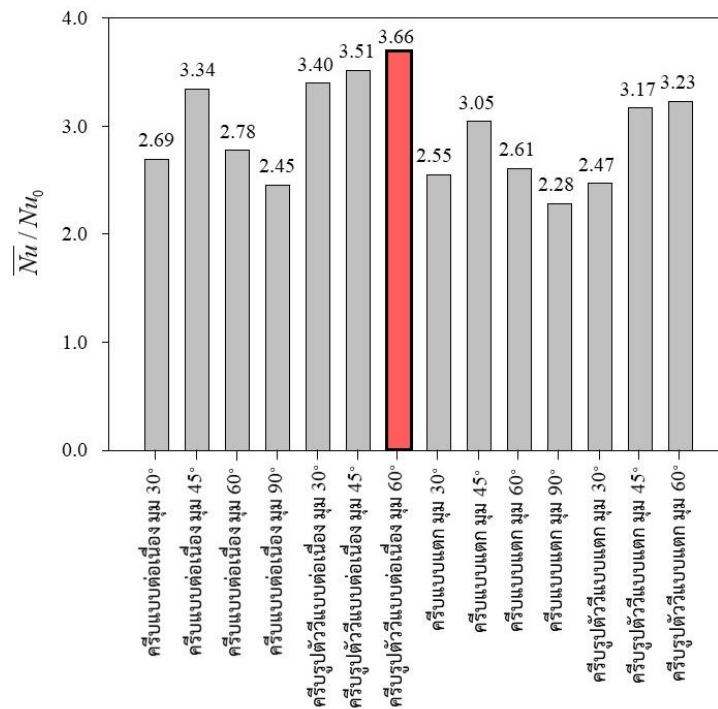
รูปที่ ก.9 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ )



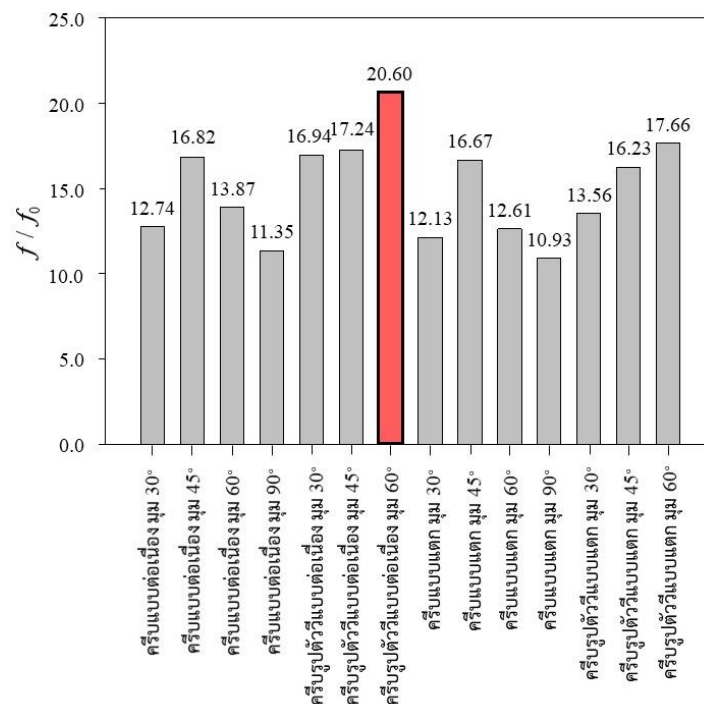
รูปที่ ก.10 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบบนต่อเนื้อ  
ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ )



รูปที่ ก.11 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบนต่อเนื้อ  
ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 800$ )

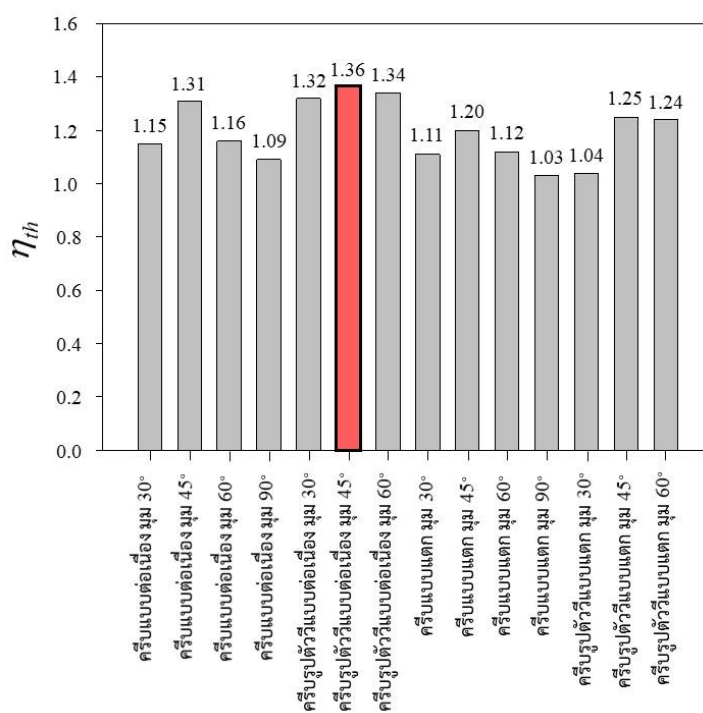


รูปที่ ก.12 อัตราส่วนนัสเซลต์ที่มีเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบน  
ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )



รูปที่ ก.13 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบบนสร้างความปั่นป่วน  
ในช่องการไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )

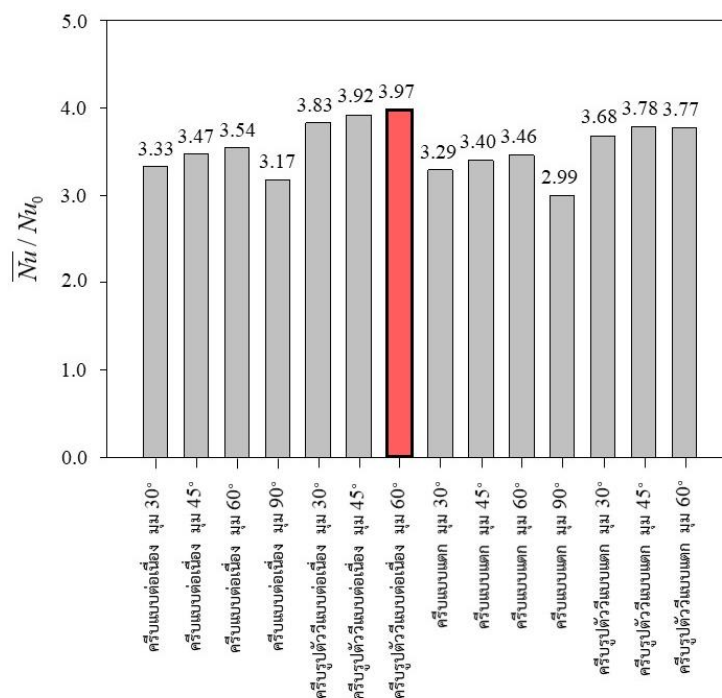




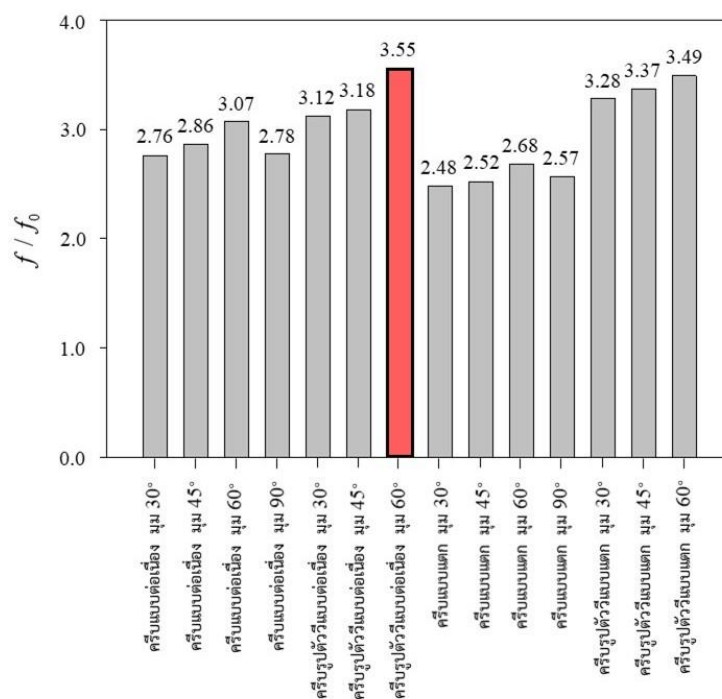
รูปที่ ก.14 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบริบ  
 ในช่องทางไหลแบบขนาน ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 1,200$ )

#### 4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบวงกลับ

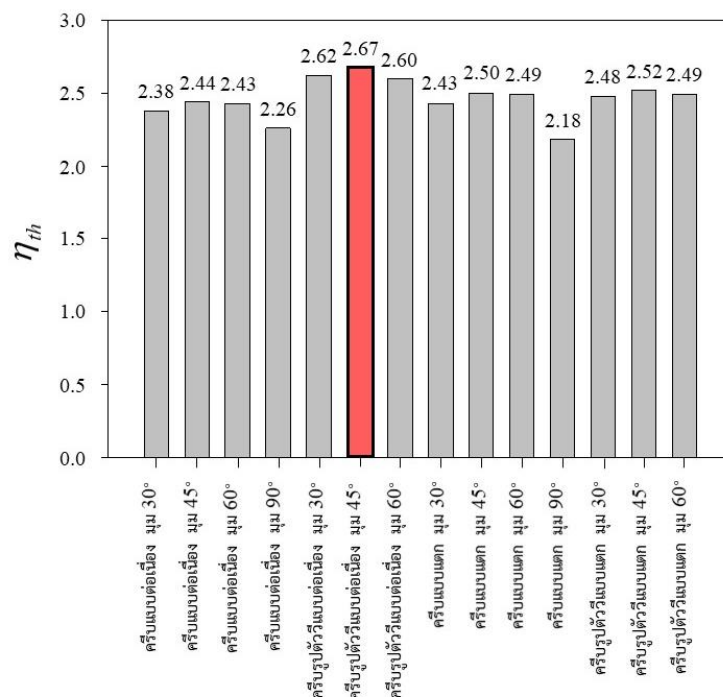
รูปที่ ก.15 ถึง ก.20 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิวเรียบ ( $\overline{Nu} / Nu_0$ ) อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลที่ติดตั้งครีบบนพื้นผิวเรียบ ( $f / f_0$ ) และสมรรถนะเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ของการติดตั้งครีบบนรูปแบบต่างๆในช่องการไหลแบบวงกลับตามลำดับ ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ ) และ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )



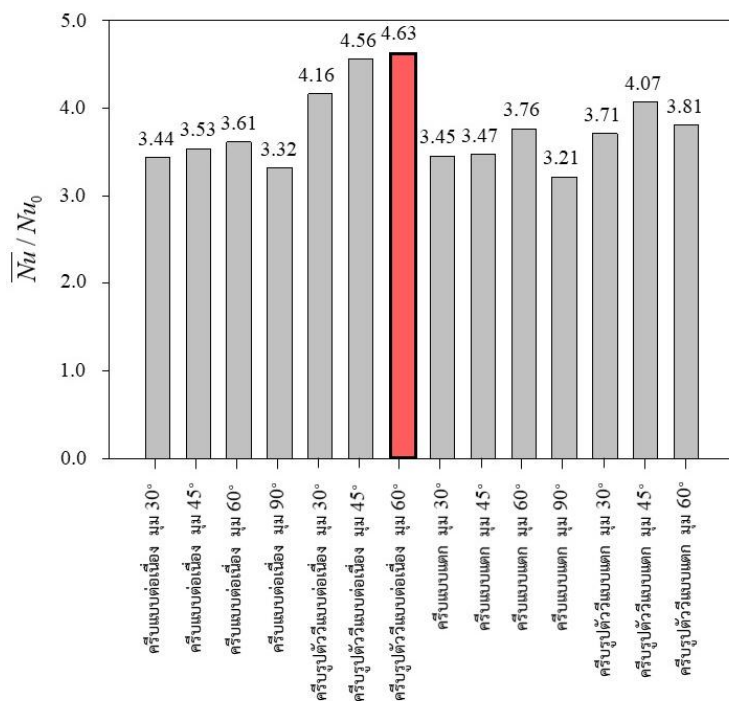
รูปที่ ก.15 อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งครีบบนช่องการไหลแบบวงกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ )



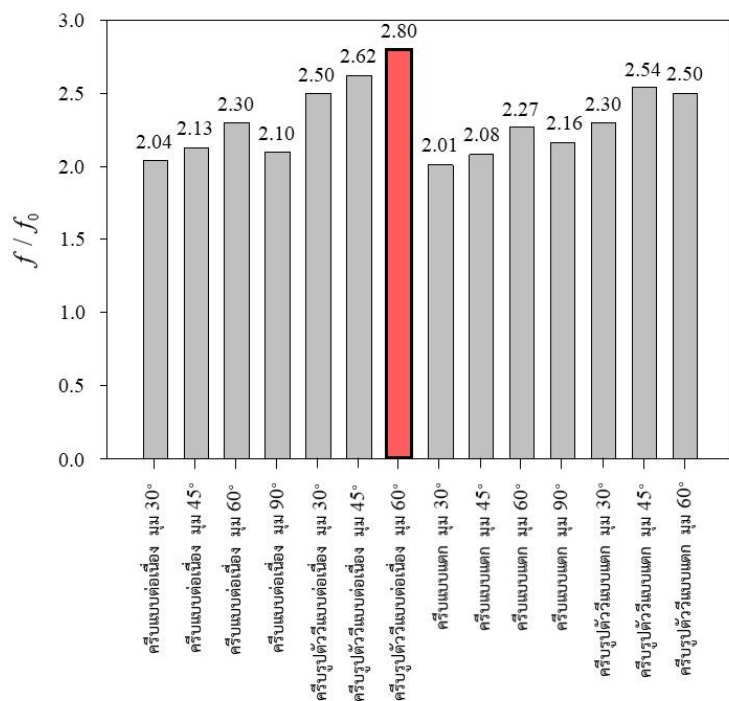
รูปที่ ก.16 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบสร้างความเป็นป่วน  
ในช่องทางไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ )



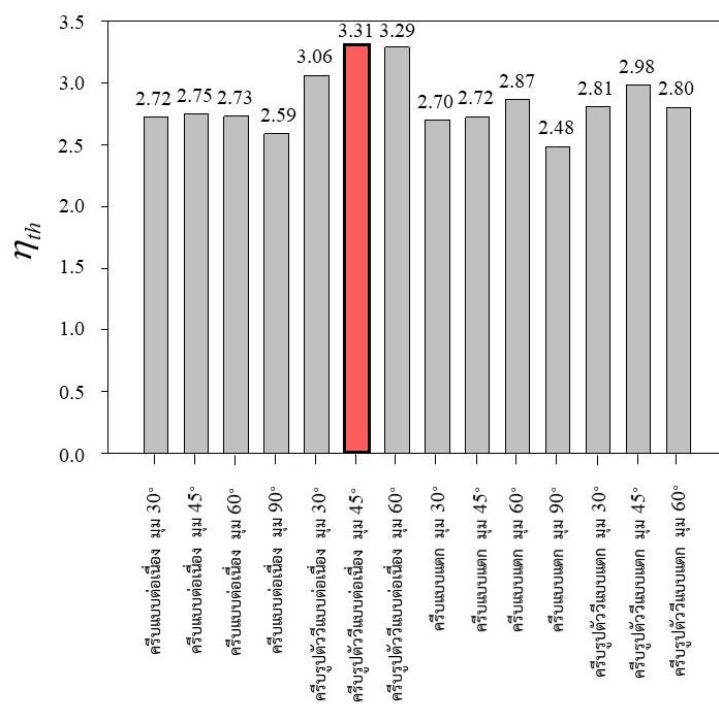
รูปที่ ก.17 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบ  
ในช่องทางไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 8 LPM ( $Re = 4,000$ )



รูปที่ ก.18 อัตราส่วนนัสเซลต์นมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบบนต่องมในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )



รูปที่ ก.19 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่ติดตั้งครีบบนต่องมในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )



รูปที่ ก.20 สมรรถนะเชิงความร้อนของพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบน  
ในช่องการไหลแบบวกกลับ ที่อัตราการไหลน้ำ 12 LPM ( $Re = 6,000$ )

ภาคผนวก ข.  
การวิเคราะห์ค่า Uncertainty  
ของการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน

## Uncertainty of Nusselt number by using Infrared method (25-30 °C)

$$\frac{\delta y}{y} = \left[ \left( \frac{\delta y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\delta y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \left( \frac{\delta y}{\partial x_3} \delta x_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\delta y}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{0.5}$$

**Table 1** Uncertainties of measured parameters

No.	Parameters	Symbol	Instrument	Uncertainty
1	Dimensions of flow channel Width Height Length	$W$ $H$ $L$	Linear scale Linear scale Linear scale	$\pm 1.0$ mm $\pm 1.0$ mm $\pm 1.0$ mm
2	Roughness parameters Height Pitch Angle	$e$ $p$ $\alpha$	Digital Vernier caliper Digital Vernier caliper Protractor	$\pm 0.01$ mm $\pm 0.01$ mm $\pm 1$ degree
3	Temperature distribution on surface	$T_s$	Infrared camera (FLIT T-420)	$\pm 0.05$ °C
4	Temperature measurement	-	Temperature sensor (Pt-100)	$\pm 0.1$ °C
5	Flow rate	$Q$	Tube type flow meter (FLOWTECH Z5008)	$\pm 0.03$ LPM
6	Electrical current	$I$	DC power supply	$\pm 0.1$ A
7	Voltage	$V$	Digital voltmeter	$\pm 0.005$ V
	Pressure drop	$\Delta P$	Pressure transducer (OMEGA PX-154)	$\pm 0.03$ inH <sub>2</sub> O

**Table 2** Range of uncertainty in the computed parameter for the experimental data

Sr. No.	Parameters	Symbol	Values	Uncertainty (%)
1	Reynolds number	$Re$	400-6,000	0.75-3.38
2	Nusselt number	$Nu$	18.2-72.3	4.02-4.73
3	Friction factor	$f$	0.34-2.78	3.74
4	Thermal performance	$\eta_{th}$	1.0-3.5	5.49

## 1) To find the Nusselt number ( $Nu$ )

- Area of stainless sheet ( $A$ )

$$A = W_t \cdot L_t$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[ \left( \frac{\delta W_t}{W_t} \right)^2 + \left( \frac{\delta L_t}{L_t} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[ \left( \frac{1}{290} \right)^2 + \left( \frac{1}{260} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.005165 = 0.5165\%$$

- Input heat flux ( $\dot{q}_{input}$ )

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} = \left[ \left( \frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} = \left[ \left( \frac{0.1}{38.95} \right)^2 + \left( \frac{0.005}{0.63} \right)^2 + (0.005165)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.009811 = 0.9811\%$$

- Heat loss from radiation ( $\dot{q}_{loss,r}$ )

$$\dot{q}_{loss,r} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{am}^4)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{loss,r}}{\dot{q}_{loss,r}} = \left[ \left( \frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + \left( \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_s}{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_{am}}{T_{am}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{loss,r}}{\dot{q}_{loss,r}} = \left[ \left( \frac{0.01}{5.67} \right)^2 + \left( \frac{0.01}{0.98} \right)^2 + \left( \frac{0.05}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.1}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.011243 = 1.1243\%$$

- Characteristic length ( $L_C$ )

$$L_C = \frac{W_t + L_t}{W_t^2 + L_t^2}$$

$$\frac{\delta L_C}{L_C} = \left[ \left( \frac{\delta W_t}{W_t} \right)^2 + \left( \frac{\delta L_t}{L_t} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta L_C}{L_C} = \left[ \left( \frac{1}{290} \right)^2 + \left( \frac{1}{260} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.005165 = 0.5165\%$$

- Rayleigh number ( $Ra_L$ )

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_{am}) L_C^3}{\nu \alpha}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[ \left( \frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left( \frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_s}{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_{am}}{T_{am}} \right)^2 + \left( \frac{\delta L_C}{L_C} \right)^2 + \left( \frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 + \left( \frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[ \left( \frac{0.01}{9.81} \right)^2 + \left( \frac{0.00001}{0.00336} \right)^2 + \left( \frac{0.05}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.1}{25} \right)^2 + (0.005165)^2 + \left( \frac{0.001}{8.714} \right)^2 + \left( \frac{0.001}{1.508} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.007498 = 0.7498\%$$

- Nusselt number for natural convection ( $Nu$ )

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[ 1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}}$$

$$\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} = \left[ \left( \frac{\delta Ra_L}{Ra_L} \right)^2 + \left( \frac{\delta Pr}{Pr} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} = \left[ (0.007498)^2 + \left( \frac{0.0001}{5.7763} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.007498 = 0.7498\%$$



- Heat transfer coefficient for natural convection ( $h_{loss,c}$ )

$$h_{loss,c} = \frac{Nu_L k}{L_C}$$

$$\frac{\delta h_{loss,c}}{h_{loss,c}} = \left[ \left( \frac{\delta Nu_L}{Nu_L} \right)^2 + \left( \frac{\delta k}{k} \right)^2 + \left( \frac{\delta L_C}{L_C} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h_{loss,c}}{h_{loss,c}} = \left[ (0.007498)^2 + \left( \frac{0.00001}{0.61229} \right)^2 + (0.005165)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.009105 = 0.9105\%$$

- Heat loss from natural convection ( $\dot{q}_{loss,c}$ )

$$\dot{q}_{loss,c} = h_{loss,c} (T_s - T_{am})$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{loss,c}}{\dot{q}_{loss,c}} = \left[ \left( \frac{\delta h_{loss,c}}{h_{loss,c}} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_s}{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_{am}}{T_{am}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{loss,c}}{\dot{q}_{loss,c}} = \left[ (0.009105)^2 + \left( \frac{0.05}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.1}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.010104 = 1.0104\%$$

- Heat transfer coefficient ( $h$ )

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{loss,r} - \dot{q}_{loss,c}}{T_s - T_{am}}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[ \left( \frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \dot{q}_{loss,r}}{\dot{q}_{loss,r}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \dot{q}_{loss,c}}{\dot{q}_{loss,c}} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_s}{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_f}{T_f} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[ (0.009811)^2 + (0.011243)^2 + (0.010104)^2 + \left( \frac{0.05}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.1}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.018513 = 1.8513\%$$

- Nusselt number ( $Nu$ )

$$Nu = \frac{h D_h}{k}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[ \left( \frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{\delta k}{k} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[ (0.018513)^2 + \left( \frac{1}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.00001}{0.61229} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.040228 = 4.0228\% \quad \text{Ans.}$$

## 2) To find the Reynold number ( $Re$ )

- Inlet velocity ( $V$ )

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$\frac{\delta V}{V} = \left[ \left( \frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta V}{V} = \left[ \left( \frac{0.03}{4} \right)^2 + \left( \frac{1}{1000} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.007566 = 0.7566\%$$

- Reynolds number (Re)

$$\text{Re} = \frac{VD_h}{\nu}$$

$$\frac{\delta \text{Re}}{\text{Re}} = \left[ \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 \left( \frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \text{Re}}{\text{Re}} = \left[ (0.007566)^2 + \left( \frac{0.1}{28} \right)^2 \left( \frac{0.001}{8.714} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.036507 = 3.6507 \% \quad \text{Ans.}$$

$$\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \left[ (0.040228)^2 + (0.037416)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.054938 = 5.4938\% \quad \text{Ans.}$$

### 3) To find the friction factor (f)

- Friction factor (f)

$$f = \frac{(\Delta P)D_h}{2\rho LV^2}$$

$$\frac{\delta f}{f} = \left[ \left( \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta f}{f} = \left[ \left( \frac{0.01}{22.12} \right)^2 + \left( \frac{1}{28} \right)^2 + \left( \frac{0.1}{997} \right)^2 + \left( \frac{1}{320} \right)^2 + (0.007566)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.037416 = 3.7416\% \quad \text{Ans.}$$

### 4) To find the thermal performance ( $\eta_{th}$ )

- Thermal performance ( $\eta_{th}$ )

$$\eta_{th} = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}}$$

$$\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \left[ \left( \frac{\delta Nu}{Nu} \right)^2 + \left( \frac{\delta f}{f} \right)^2 \right]^{0.5}$$

ภาคผนวก ค.  
คุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน

## Poly-Crystalline Solar PV Module 36 Cells Series



### Performance

- ♦ Water resistant junction box with bypass diode and high strength polymer sheet on module's rear ensures module is sealed from moisture and mechanical damage
- ♦ High transmissivity low-iron toughened glass
- ♦ Excellent week light performance
- ♦ Unique drainage hole design and anodized aluminum frame

### Quality and Reliability

- ♦ Superior reliability with guaranteed 0~3% power output tolerance
- ♦ 10 years warranty on materials and workmanship,
- ♦ 25 years linear power warranty, 97% in the first year, 91% in 10<sup>th</sup> year, and ending with 80% in 25<sup>th</sup> year
- ♦ Cells are individually tested, characterized and modulated prior to interconnection
- ♦ Test and produce standard: IEC61215, IEC61730, ISO 9001:2008, ISO14001:2004, OHSAS18001:2007, TIS18001:2011, TIS1843:2553, TIS2580:2555

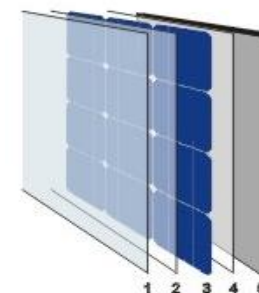
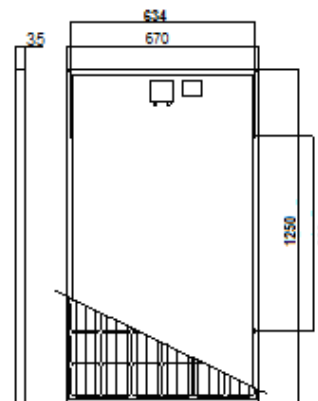
## Electrical Characteristics

Specification	FX-100P	FX-105P	FX-110P	FX-115P	FX-120P	FX-125P	FX-130P
Rating power at STC (Wp)	100W	105W	110W	115W	120W	125W	130W
Open circuit voltage (Voc)	21.7V	22.0V	22.2V	22.3V	22.4V	22.6V	22.7V
Short circuit current (Isc)	7.02A	7.11A	7.19A	7.28A	7.36A	7.45A	7.54A
Rated voltage (Vm)	17.27V	17.38V	17.49V	17.58V	17.67V	17.76V	17.83V
Rated current (Im)	5.79A	6.04A	6.29A	6.54A	6.79A	7.04A	7.29A
Module efficiency (%)	11.94%	12.54%	13.13%	13.73%	14.33%	14.93%	15.52%
Power tolerance	0 - 3 % (W)						
Temperature coefficient of Pm	-0.47%/K						
Temperature coefficient of Isc	+0.038%/K						
Temperature coefficient of Voc	-0.34%/K						
Maximum system voltage	DC600v (UL) / DC1000V (IEC)						

All technical data at STC: AM1.5; 1000W/m<sup>2</sup>; 25°C

## Mechanical Characteristics

Solar Cell	Polycrystalline
No. of cells	36 (4X9)
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	46 ± 2 °C
Operation temperature	From -40 to + 85°C
Typical Application	12V DC
Max series fuse rating	10A
Max wind resistance	2400Pa
Surface max. load capacity	5400Pa
Weight	9.5kg
Dimension	1250X670X35MM



1. Tempered glass
2. EVA
3. Cells
4. EVA
5. Back sheet

## Poly-Crystalline Solar PV Module 36 Cells Series



### Performance

- ♦ Water resistant junction box with bypass diode and high strength polymer sheet on module's rear ensures module is sealed from moisture and mechanical damage
- ♦ High transmissivity low-iron toughened glass
- ♦ Excellent week light performance
- ♦ Unique drainage hole design and anodized aluminum frame

### Quality and Reliability

- ♦ Superior reliability with guaranteed 0~3% power output tolerance
- ♦ 10 years warranty on materials and workmanship,
- ♦ 25 years linear power warranty, 97% in the first year, 91% in 10<sup>th</sup> year, and ending with 80% in 25<sup>th</sup> year
- ♦ Cells are individually tested, characterized and modulated prior to interconnection
- ♦ Test and produce standard: IEC61215, IEC61730, ISO 9001:2008, ISO14001:2004, OHSAS18001:2007, TIS18001:2011, TIS1843:2553, TIS2580:2555

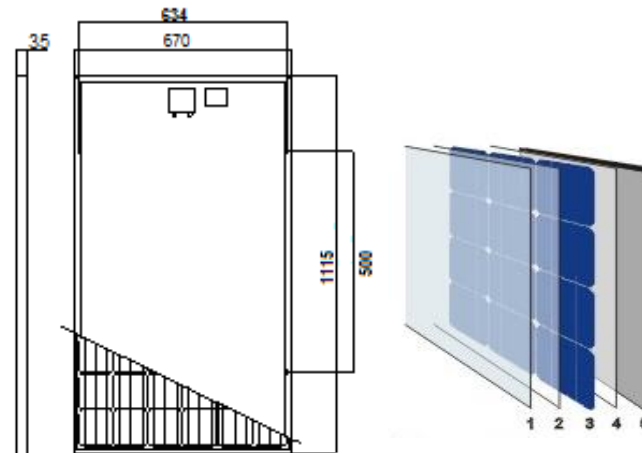
### Electrical Characteristics

Specification	FY1-90P	FY1-95P	FY1-100P	FY1-105P	FY1-110P	FY1-115P	FY1-120P
Rating power at STC (Wp)	90W	95W	100W	105W	110W	115W	120W
Open circuit voltage (Voc)	21.7V	22.0V	21.7V	22.0V	22.2V	22.3V	22.4V
Short circuit current (Isc)	5.31A	5.53A	5.90A	6.12A	6.35A	6.61A	6.86A
Rated voltage (Vm)	17.21	17.34V	17.45V	17.56V	17.66V	17.75V	17.83V
Rated current (Im)	5.23A	5.48A	5.73A	5.98A	6.23A	6.48A	6.73A
Module efficiency (%)	12.05%	12.72%	13.39%	14.06%	14.72%	15.39%	16.06%
Power tolerance	0 - 3 % (W)						
Temperature coefficient of Pm	-0.47%/K						
Temperature coefficient of Isc	+0.038%/K						
Temperature coefficient of Voc	-0.34%/K						
Maximum system voltage	DC600v (UL) / DC1000V (IEC)						

All technical data at STC: AM1.5; 1000W/m<sup>2</sup>; 25°C

### Mechanical Characteristics

Solar Cell	Polycrystalline
No. of cells	36 (4X9)
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	46 ± 2 °C
Operation temperature	From -40 to + 85°C
Typical Application	12V DC
Max series fuse rating	10A
Max wind resistance	2400Pa
Surface max. load capacity	5400Pa
Weight	8.5kg
Dimension	1115X670X35MM



1. Tempered glass
2. EVA
3. Cells
4. EVA
5. Back sheet

## Poly-Crystalline Solar PV Module

Model	Electricity Performance Parameter					Module Size L x W x H (mm)	Installation Size			Weight (Kgs)
	Wp (W)	Vmp (V)	Imp (A)	Isc (A)	Voc (V)		A (mm)	B (mm)	Hole size (mm)	
F-80P	80	17.4	4.60	5.00	22.2	836X670X35	458	634	4-φ8.0	~7.5
F-70P	70	17.6	3.98	4.43	21.8	758X670X35	458	634	4-φ8.0	~6.8
F-65P	65	17.6	3.69	4.11	21.8	758X670X35	458	634	4-φ8.0	~6.8
F-60P	60	17.4	3.45	3.9	21.6	758X670X35	458	634	4-φ8.0	~6.8
F-50P	50	17.4	2.89	3.13	21.8	656X670X35	356	634	4-φ8.0	~5.5
F-40P	40	17.4	2.30	2.58	21.8	490X670X25	Without installation hole			~3.8
F-30P	30	17.2	1.74	1.94	21.6	470x540x25				~3.2
F-20P	20	17.4	1.15	1.29	21.6	542X348X25				~2.2
F-15P	15	17.2	0.89	0.98	21.6	542X348X25				~2.2
F-10P	10	17.4	0.57	0.65	21.6	356X276X18				~1.3
FE1-6P	6	17.2	0.35	0.38	21.6	316X190x18				~0.8
F-6P	6	17.2	0.35	0.38	21.6	276X232X18				~0.9
F-5P	5	17.2	0.3	0.33	21.6	276X232X18				~0.9

All technical data at STC: AM1.5; 1000W/m<sup>2</sup>; 25 °C

### Performance

- ♦ Water resistant junction box and high strength polymer sheet on module's rear ensures module is sealed from moisture and mechanical damage
- ♦ High transmissivity low-iron toughened glass
- ♦ Excellent week light performance
- ♦ Unique drainage hole design and aluminum frame

### Quality and Reliability

- ♦ Superior reliability with guaranteed 0~3% power output tolerance
- ♦ 10 years warranty on materials and workmanship,
- ♦ 25 years linear power warranty, 97% in the first year, 91% in 10<sup>th</sup> year, and ending with 80% in 25<sup>th</sup> year
- ♦ Cells are individually tested, characterized and modulated prior to interconnection
- ♦ Test and produce standard: IEC61215, IEC61730, ISO 9001:2008, ISO14001:2004, OHSAS18001:2007, TIS18001:2011, TIS1843:2553, TIS2580:2555



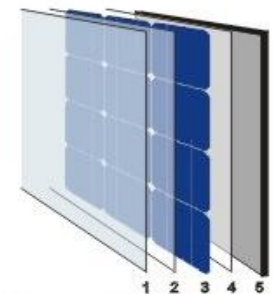
F-5P



F-15P



F-50P



1. Tempered glass
2. EVA
3. Cells
4. EVA
5. Back sheet



ภาคผนวก ง.

บทความสำหรับเผยแพร่ที่ 1

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีป

โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน



## การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน Study of heat transfer on surface with ribs attachment by using water cooling

ธนากรณ์ สุขคะโต, มั๊กตาร์ แวหะยี่, จันทกานต์ ทวีกุล และ ชยุต นันทดุสิต\*

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิทยาเขตหาดใหญ่ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

\*ติดต่อ: E-mail: chayut.n@psu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 074-287035-6, เบอร์โทรสาร: 074-558830

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนกับการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ติดครีบ โดยใช้น้ำเป็นของไหลและคำนวณหาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของครีบบูแบบต่างๆ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบด้วยรูปแบบของช่องการไหล (Channel) ซึ่งมี 2 รูปแบบด้วยกันคือ ช่องการไหลแบบขนาน (Parallel) และช่องการไหลแบบขดไปมา (Serpentine) มุมของครีบ (Rib Angle) ซึ่งจะใช้ขวางการไหลของน้ำในช่องการไหลทั้งสองรูปแบบ โดยมีการทดสอบที่มุมของครีบเท่ากับ 45°, 60° และ 90° กำหนดอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ ( $p/e$ ) ที่ 10 อัตราส่วนความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) ที่ 0.13 วิธีศึกษาการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสจะใช้กล้องอินฟราเรด จากการศึกษาพบว่ามุมการติดตั้งครีบระบายความร้อนที่ 45° ในช่องการไหลแบบขนาน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด

**คำหลัก:** การระบายความร้อนด้วยครีบ, มุมของครีบ, ค่านัสเซลต์นัมเบอร์, การถ่ายเทความร้อน

### Abstract

The objective of this work is to study on the heat transfer characteristic and pressure drop of water flow in rectangular channel with parallel ribs and is also calculate heat transfer efficiency of each rib pattern. The parameter of experiment composed of two flow arrangement type (Parallel and Serpentine flow configuration), rib angle which varies of 45°, 60° and 90°. The rib pitch to height ratio ( $p/e$ ) and Rib height to hydraulic diameter ratio ( $e/D_h$ ) were fixed at 10 and 0.13 respectively. To investigated temperature distribution on the wall by using infrared camera. In this study found that the best heat transfer is Parallel Rib 45°.

**Keyword:** Rib cooling, Rib angle, Nusselt number, Heat transfer



## 1. บทนำ

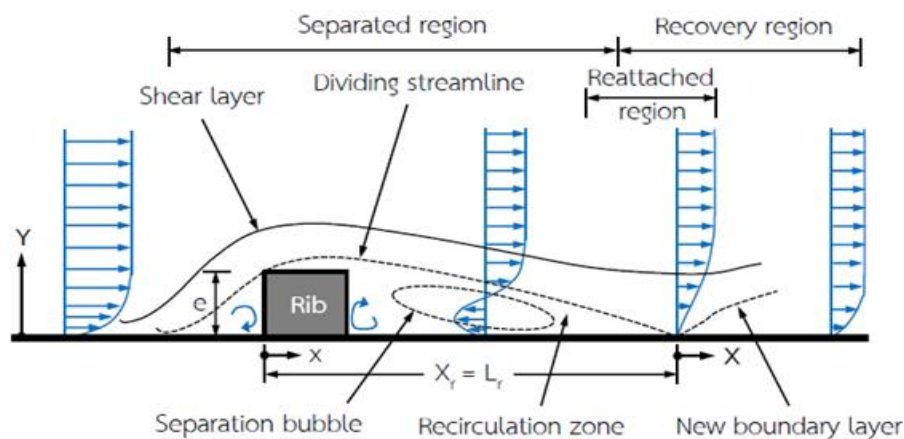
แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมากระทบ โดยไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทัวไปแล้ว แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟอยู่ที่ 15% แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดนั้นจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณผิวรับแสงและโครงสร้างโลหะ และเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 25 °C (อุณหภูมิทดสอบประสิทธิภาพตามมาตรฐาน STC) จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แนวคิดในการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้ เพื่อลดอุณหภูมิให้กับแผงและนำประสิทธิภาพที่หายไปนั้นกลับคืนมา ตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาด้านนี้ได้แก่ การลดอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผงรับแสงอาทิตย์ด้วยการสร้างฟิล์มกันน้ำ การศึกษากระบวนการระบายความร้อนแบบบังคับสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอากาศ

นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้วนั้น การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบระบายความร้อนยังเป็นส่วนที่สำคัญ การติดตั้งกลไกการระบาย

ความร้อนด้วยครีบริบ เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมาก ซึ่งครีบริบ คือส่วนที่ติดตั้งบนพื้นผิวเพื่อวางขวางการไหล ส่วนใหญ่นั้นจะวางขวางการไหลตามแนวราบทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้านหลังบริเวณที่ติดตั้งครีบริบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาการระบายความร้อนโดยใช้ครีบริบ การไหลของของไหลที่ผ่านครีบริบทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบริบ และเกิดการไหลหมุนวนจนเกาะติดผนังมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาชิ้นขอบเขตค่อนข้างมาก

การถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบริบจะขึ้นอยู่กับความสูงของครีบริบ (Rib height) ระยะห่างระหว่างครีบริบ (Pitch) มุมการติดครีบริบ (Rib Angle) รูปแบบหน้าตัดของครีบริบ (Rib profile) และช่องการไหลของครีบริบ (Rib channel) ตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน

นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ยังขึ้นอยู่กับระยะการไหลหมุนวนเกาะติดกับผนัง (Reattachment length,  $L_r$ ) ดังแสดง ในรูปที่ 1 โดยระยะการไหลหมุนวนเกาะติดกับผนังมาก จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดี



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างการไหลผ่านครีบริบต่อการถ่ายเทความร้อน [1]



การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งครีบและช่องการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการระบายความร้อน

Webb และคณะ [2] ได้ทำนายผลของรูปแบบการไหลตามแนวกระแสของครีบที่ระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบ ( $p/e$ ) ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าในกรณีที่มีระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบต่ำๆ ( $p/e < 5$ ) จะเกิดการไหลแยกตัวที่ด้านหลังของครีบตัวแรกและหมุนวนขึ้นระหว่างครีบทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบต่ำๆ จะไม่ก่อให้เกิดระยะการไหลเกาะติดผนัง (Reattachment length) แต่ในทางตรงข้าม หากระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบเพิ่มขึ้น จะเกิดการไหลแยกตัวหมุนวนด้านหลังครีบตัวแรกและเกิดระยะการไหลเกาะติดบริเวณผนังด้วย นอกจากนี้จากการทดสอบยังพบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ระยะพิตซ์ต่อความสูงครีบประมาณ 10 สำหรับช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Park และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล ( $W/H$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ในการทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล ( $W/H$ ) ที่ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 โดยตัดครีบทำมุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 30,000 จากผลการทดลองพบว่า การตัดครีบทำมุม  $60^\circ$  ค่าการถ่ายเทความร้อนนั้นไม่มีนัยสำคัญมาก แต่ค่าความดันลดนั้นเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก (0.25 ถึง 4)

E.Skoplaki และ J.A. Palyvos [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพลังงาน พบว่าอุณหภูมินั้นมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการแปลงไฟฟ้า และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจากความเข้มของแสงอาทิตย์ จะทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่แผงโมดูล โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของอากาศ และสภาพแวดล้อม เป็นต้น

Krauter และคณะ [5] ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทดสอบปล่อยน้ำให้ไหลผ่านบริเวณผิวรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมเดล M 55 จำนวน 2 แผง เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์วงจรเปิด และกำลังและกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน วางเรียงทำมุมตามละติจูดของพื้นที่ (23 องศาเหนือ) วัดค่าความเข้มแสงในระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปล่อยน้ำด้วยหัวฉีดจำนวน 12 หัว ที่ติดตั้งอยู่เหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราการไหล 2 LPM ให้กระจายน้ำเป็นฟิล์มบางประมาณ 1 mm ปรากฏว่าสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ทำงานได้มากถึง  $22^\circ\text{C}$  และผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 10.3% ต่อวัน

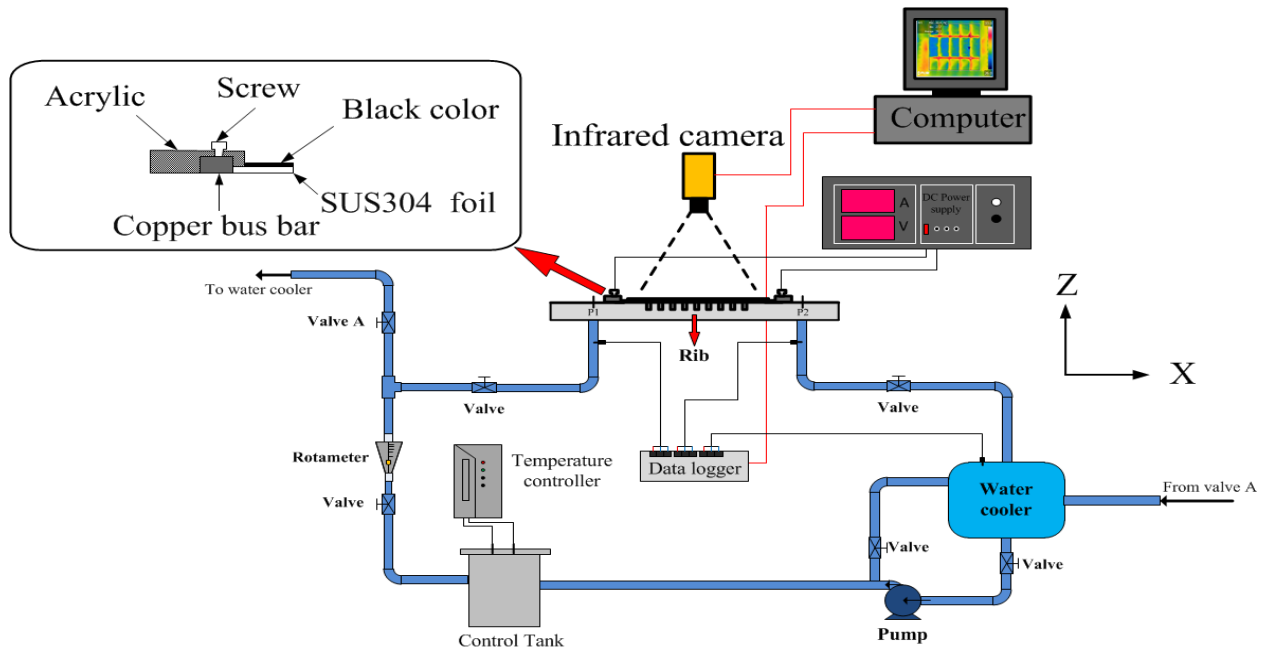
อิสระพงศ์และคณะ [6] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์เชิงพาณิชย์ ขนาดของแผง  $0.99\text{ m} \times 1.96\text{ m}$  ทำการตัดครีบบลูมิเนียมใต้แผง และใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในช่องใต้แผงที่หุ้มฉนวน ด้วยอัตราการไหลของอากาศที่  $0.037\text{-}0.0725\text{ kg/s}$  ทั้งที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นทำให้อุณหภูมิของแผงโมดูลนั้นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น โดยได้ทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่  $998.10\text{-}1186.82\text{ W/m}^2$  โดยได้ผลว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเมื่อมีการระบายความร้อนนั้น มีค่าสูงกว่ากรณีแผงโมดูลปกติถึงร้อยละ 24 ซึ่งคล้ายกับผลของการตัดครีบที่มุม  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  โดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลน้อย จะได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลที่มากยกเว้นที่ครีบทำมุม  $30^\circ$  จะให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และความดันลดที่เพิ่มขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับครีบบวมอื่นๆ

จากงานวิจัยที่กล่าวมานำเสนอในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมกับการพัฒนาการระบายความร้อนด้วยครีบนั้น ยังไม่มีการใช้น้ำเป็นการไหลร่วมกับกลไกการระบายความร้อนด้วยครีบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น เพื่อหาแบบการติดตั้งครีบและช่องการไหลที่ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

## 2. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

### 2.1 ชุดทดลอง

แผนภาพชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ส่วนทดสอบ (Test Section) ที่มีหน้าตัด 300 mm x 20 mm และมีความยาวที่ 600 mm โดยส่วนทดสอบนั้นทำจากแผ่นอะคริลิกประกบกัน 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

ชั้นบนของส่วนทดสอบได้มีการติดแผ่นสแตนเลส (ด้านใน ส่วนทดสอบ) นั้นเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับตัดครีบและช่อง การไหลรูปแบบต่างๆ ส่วนผนังอีกด้านถูกพันด้วยสเปรย์สีดำ ด้าน เพื่อช่วยในการถ่ายภาพอินฟราเรดและลดการแผ่รังสี ความร้อน แผ่นสแตนเลสถูกซิงค์โดยแท่งทองแดงแบน (Bus bar) ขนาด 25 mm x 300 mm x 4 mm ระบบควบคุม อุณหภูมิ น้ำเป็นระบบใช้สำหรับควบคุมของอุณหภูมิน้ำก่อน เข้าส่วนทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยถังน้ำ ซึ่งทำจากแผ่น เหล็กหนา 3 mm มีปริมาตรความจุที่ 36 L ภายในติดตั้งฮีท เตอร์กำลังไฟฟ้ารวม 4500 W ท่อทางน้ำออกติดตั้งอุปกรณ์ วัดอุณหภูมิ Thermocouple ชนิด Pt 100 ซึ่งต่อเข้ากับ Temperature Control Unit เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำให้ได้ 25 °C ก่อนส่งไปยังส่วนทดสอบ ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการ ไหลเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter) ไปยังส่วน ทดสอบระบบทำความเย็น เป็นระบบที่ใช้เตรียมน้ำเย็นที่ อุณหภูมิ 23 °C ก่อนส่งไปยังระบบควบคุมน้ำ โดยปั้มน้ำ ขนาด 0.5 hp ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วย ถังน้ำเย็นขนาด 36 L ซึ่งรับน้ำมาจากทางออกของส่วนทดสอบภายในถังน้ำเย็น

บรรจุชุดท่อทองแดง ซึ่งภายในท่อทองแดงนั้นมีน้ำอุณหภูมิ 15 °C ซึ่งมาจากเครื่องทำน้ำเย็นไหลเวียนอยู่ และภายในถัง น้ำเย็นนั้น ยังติดตั้งปั้มน้ำขนาดเล็ก (20 W) เพื่อใช้ในการ หมุนเวียนน้ำในถัง โดยถังน้ำเย็นนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัด อุณหภูมิ ชนิด Pt 100 ไว้ด้วยเช่นกัน

ระบบสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่ จะสร้างฟลักซ์ความ ร้อนเกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส (ที่ติดอยู่บนส่วน ทดสอบ) ซึ่งจะประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายกระแสไฟฟ้ามายังแท่งทองแดงซึ่งติดอยู่กับแผ่นสแตน เลสที่แผ่นบนของส่วนทดสอบ

อุปกรณ์วัดประกอบด้วย กล้องอินฟราเรด ใช้ในการ ถ่ายภาพ การกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวสแตนเลส หัววัดอุณหภูมิ ชนิด Pt 100 ใช้ในการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ ทางเข้า-ออก ส่วนทดสอบ, ท่อทางออกถังเก็บน้ำของระบบ ควบคุมอุณหภูมิ น้ำ, ภายในถังน้ำเย็นและอุณหภูมิห้อง ซึ่ง ข้อมูลจาก Pt 100 ดังกล่าวจะถูกเก็บโดยใช้ Data logger และวัดค่าการสูญเสียความดันโดยใช้ Pressure Transducer

2.2 วิธีการและตัวแปรในการทดลอง

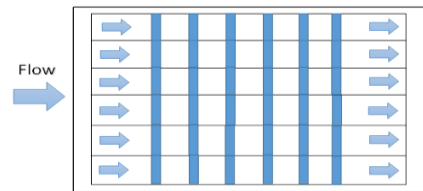
น้ำที่ 25 °C จะไหลผ่านวาล์วและเครื่องวัดอัตราการไหลซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 5 LPM ในทุกรูปแบบของครีบบและช่องการไหล เมื่อน้ำเข้าสู่ส่วนทดสอบจะผ่านตะแกรงซึ่งมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm เพื่อให้เกิดการไหลที่สม่ำเสมอ น้ำผ่านไปยังส่วนทดสอบที่มีการติดตั้งครีบบและช่องการไหลบนผิวของแผ่นสแตนเลส ซึ่งสแตนเลสนี้เป็นบริเวณฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 500 W/m<sup>2</sup> ซึ่งเกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจาก DC Power Supply เมื่อน้ำไหลผ่านส่วนทดสอบจะกลับเข้าสู่ถังน้ำเย็นซึ่งภายในบรรจุชุดท่อทองแดงที่มีอุณหภูมิ 10 °C ไหลเวียนอยู่ เกิดจากการเปลี่ยนความร้อน ทำให้น้ำในถังน้ำเย็นมีอุณหภูมิ 23 °C โดยการทดลองจะบันทึกการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลส อุณหภูมิน้ำเข้าออกส่วนทดสอบ อุณหภูมิน้ำในถังน้ำเย็น อุณหภูมิห้องทดลอง อัตราการไหลของน้ำและค่าการสูญเสียความดัน

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

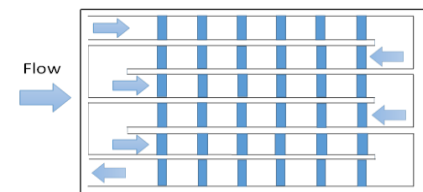
Parameter	Symbol	Value
1. Constant heat flux	$q'$	500 W/m <sup>2</sup>
2. Water temperature at inlet	$T_{in}$	25 °C
3. Water temperature at outlet	$T_{out}$	-
4. Water temperature in control tank	$T_c$	25 °C
5. Ambient temperature	$T_{am}$	25 °C
6. Water flow rate	$m'$	5 LPM
7. Stain less sheet Area	A	0.099 m <sup>2</sup>
8. Rib Angle	$\alpha$	45°, 60°, 90°
9. Channel aspect ratio	W/H	4.65
10. Channel hydraulic diameter	$D_h$	0.037 m
11. Relative roughness	$e/D_h$	0.13
12. Reynolds number	Re	640

2.3 รูปแบบช่องการไหลและการติดตั้งครีบบ

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดรูปแบบที่ใช้ทดสอบทั้งสิ้น 6 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบในช่องการไหลแบบขนาน (Parallel channel) ด้วยมุมของไหลปะทะกับครีบบที่ 45°, 60° และ 90° กับ การทดสอบในช่องการไหลแบบขดไปมา (Serpentine channel) ด้วยมุมของไหลปะทะกับครีบบที่ 45°, 60° และ 90° เช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบในรูปแบบที่ไม่มีการติดตั้งช่องการไหลและครีบบ หรือเรียกว่า การไหลในช่องการไหลแบบผิวเรียบ (Smooth wall) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์

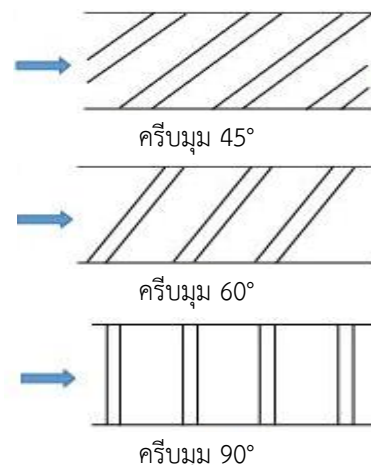


(ก) ช่องการไหลแบบขนาน (Parallel channel)

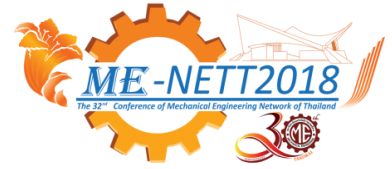


(ข) ช่องการไหลแบบขดไปมา (Serpentine channel)

รูปที่ 3 รูปแบบช่องการไหลภายในส่วนทดสอบ



รูปที่ 4 การติดตั้งครีบบทำมุมต่างๆ ในช่องการไหล



### 3) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลการทดลอง

#### 3.1 ทฤษฎี

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังพื้นผิวที่ทำจากแผ่นสแตนเลสบางจะเกิดความร้อนคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{input} = IV \quad (1)$$

โดย  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (A)

$V$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดระหว่างแท่งทองแดงที่ซึ่งแผ่นสแตนเลส (V)

จากนั้นจะใช้น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C ไหลผ่านพื้นผิวแผ่นสแตนเลสที่ติดครีบริบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว ( $h$ ) จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_f)} \quad (2)$$

โดย  $\dot{Q}_{input}$  คือ อัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสแตนเลสจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (W)

$\dot{Q}_{losses}$  คือ อัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสี และการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผิวด้านหลังของแผ่นสแตนเลส

$A$  คือ พื้นที่ของแผ่นสแตนเลส ( $m^2$ )

$T_w$  คือ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่แสดงบนแผ่นสแตนเลส (°C)

$T_f$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและออกส่วนทดสอบ (°C)

จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าตัวเลขเชลตันน์เบอร์ (Nusselt number, Nu) บนพื้นผิวได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

โดย  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล (m)

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ (W/m.k)

และสามารถคำนวณค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของการไหลในส่วนทดสอบได้จากสมการ

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (4)$$

โดย  $V$  คือ อัตราเร็วการไหลของน้ำ (m/s)

$\nu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Kinematic viscosity ของน้ำ ( $m^2/s$ )

สำหรับการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนนั้นจะเปรียบเทียบจากอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าพิสเชลตันน์เบอร์ต่อผลอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานบนพื้นผิว ซึ่งเรียกว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดังสมการ

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (5)$$

โดย Nu คือ ค่าตัวเลขเชลตันน์เบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบริบาย

$Nu_0$  คือ ค่าตัวเลขเชลตันน์เบอร์บนพื้นเรียบ (ไม่มีครีบริบาย)

$f$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวที่ติดครีบริบาย ซึ่งสมการคำนวณได้จาก

$$f = \frac{2(\Delta P)(D_h)}{\rho u^2 L} \quad (6)$$

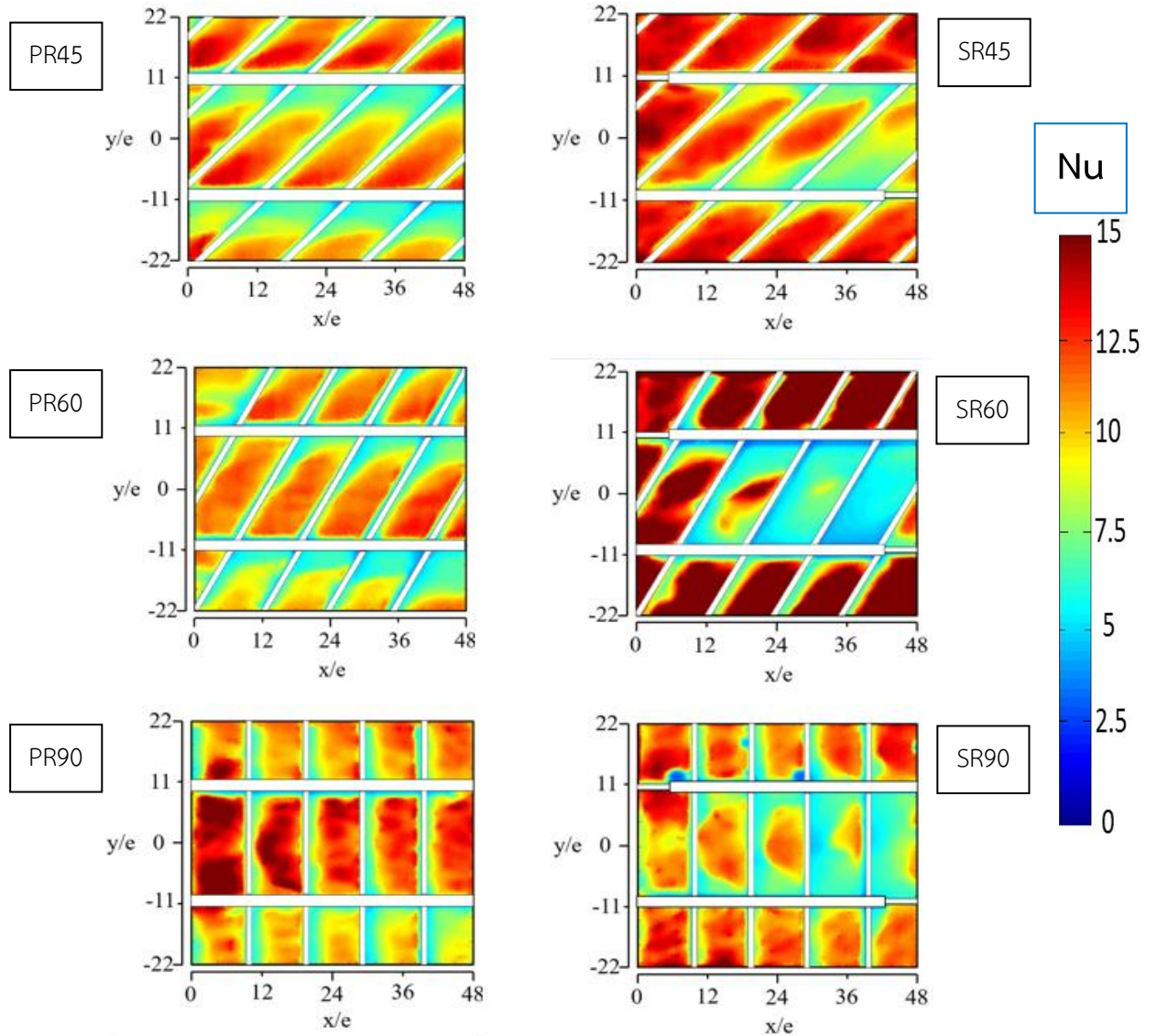
โดย  $\Delta P$  คือ ค่าความดันลดที่วัดระหว่างทางเข้า-ออก ส่วนทดสอบ

$f_0$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวเรียบ (ไม่มีครีบริบาย)

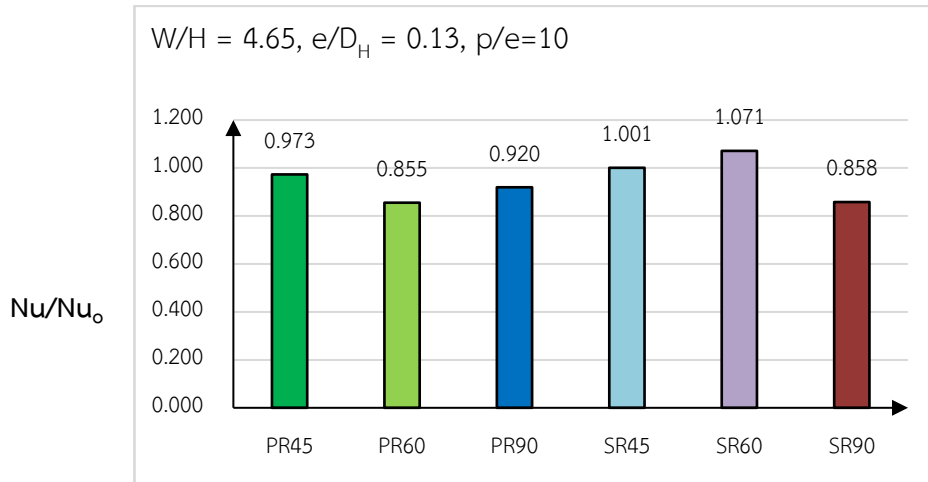


3.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

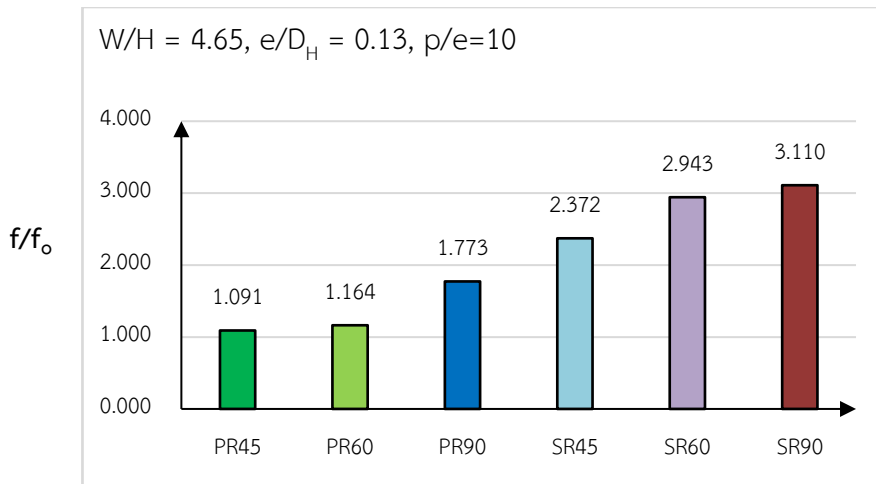
ผลการกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์ (Local Nusselt number distribution) ทั้ง 6 กรณีได้แก่ Parallel rib 45° (PR45), Serpentine rib 45° (SR45), Parallel rib 60° (PR60), Serpentine rib 60° (SR60), Parallel rib 90° (PR90), Serpentine rib 90° (SR90) แสดงดังรูปด้านล่าง



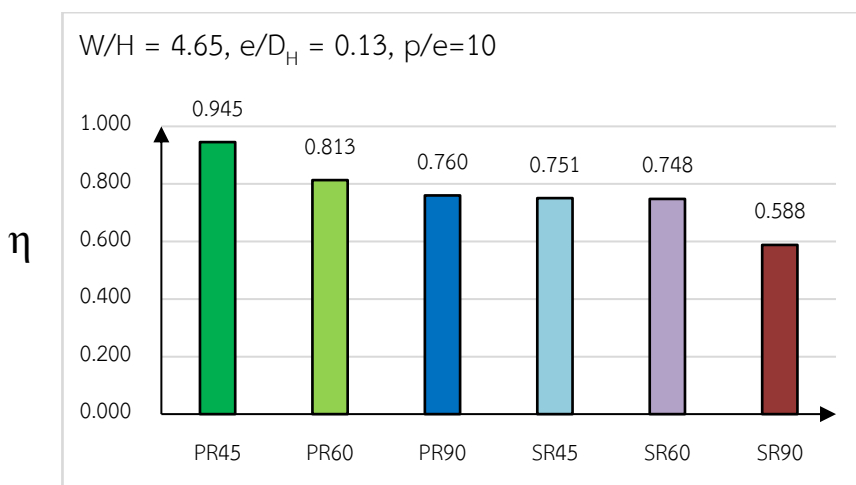
รูปที่ 5 แสดงการกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนแผ่นสแตนเลสในรูปแบบช่องการไหลและการติดครีบ



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบต่อค่า นัสเซิลต์นัมเบอร์ของการไหลแบบผิวเรียบ ( Nu/Nu<sub>0</sub> )



รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวที่ติดครีบในแต่ละกรณีต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวเรียบ ( f/f<sub>0</sub> )



รูปที่ 8 แสดงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการทดสอบในแต่ละกรณี ( η )



#### 4. สรุปผล

จากการศึกษา การติดตั้งครีบบระบายความร้อนโดยใช้น้ำเป็นของไหล ด้วยอัตราการสร้างฟลักความร้อนคงที่เท่ากับ  $500 \text{ W/m}^2$  โดยของไหล ไหลด้วยค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 640 พบว่า มุมการติดตั้งครีบบระบายความร้อนที่  $45^\circ$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด แต่ยังไม่สามารถนำการติดตั้งครีบบที่มุมนี้ไปใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เนื่องจากค่าสมรรถนะนั้นต่ำกว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำที่ไม่มีครีบบ (ผิวเรียบ)

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T., (1998), “The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel.” ASME Journal of Turbomachinery, vol. 120, pp. 368-375.

[2] Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein. R.J., (1971), “Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated- Rib Roughness,” International Journal of Heat Mass Transfer, vol. 14, pp. 601-617.

[3] Gas Turbine Heat transfer and cooling Technology 2<sup>nd</sup> Edition ชื่อผู้เขียน Je-Chin Han, Sandip Dutta และ Srinath Ekkeed สำนักพิมพ์ Taylor & Francis Group, USA, pp372-375.

[4] E. Skoplaki and J. A. Palyvos (2009). “Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations”. Renewable Energy 34. (23-29).

[5] Stefan Krauter (2004) “Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels”. Solar Energy Materials & Solar Cells. 82: 131-137

[6] อิศระพงศ์ กันธิยะ และคณะ (2015). “การเพิ่มประสิทธิภาพและลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนด้วยอากาศ”. การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 14: 455-460.



ภาคผนวก จ.

บทความสำหรับเผยแพร่ที่ 2

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบในช่องการไหลแบบขนาน

## การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีบบนช่องทางไหลแบบขนาน STUDY ON HEAT TRANSFER OF A SURFACE WITH RIBS ATTACHMENT IN PARALLEL CHANNEL

ธนากรณ์ สุขคะโต

ณัฐพร แก้วชูทอง

มัทธาร์ แวหะยี่

จันทกานต์ ทวีกุล

ชยุต นันทคุสิต

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

90112

E-mail: [chayut@me.psu.ac.th](mailto:chayut@me.psu.ac.th)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบบนช่องทางไหลแบบขนาน ได้แก่ ครีบบนมุม 90°, ครีบบนเอียงมุม 60°, ครีบบนเอียงมุม 60° แบบแตก, ครีบบนตัววีมุม 60° และ ครีบบนตัววีมุม 60° แบบแตก โดยในการศึกษาใช้ครีบบนที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความสูง  $e = 5 \text{ mm}$  ติดตั้งบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องทางไหลแบบขนาน โดยจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน ช่องทางไหลแบบขนานมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนระหว่างความสูงครีบบนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) และอัตราส่วนระหว่างระยะพิทต่อความสูงครีบบน ( $p/e$ ) เท่ากับ 0.18 และ 10 ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองที่ค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ 400, 800 และ 1200 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองพบว่า การติดตั้งครีบบนแบบ ครีบบนตัววีมุม 60° แบบแตก ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

**คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน, การระบายความร้อนด้วยน้ำ, ครีบบน, ค่านัสเซลต์จำนวนเบอร์

### Abstract

The objective of this research is to study heat transfer characteristic for 90° ribs, 60° inclined ribs, 60° inclined broken ribs, 60°V ribs and 60°V broken ribs. The height of rib ( $e$ ) is 5 mm were place on heat transfer surface in parallel channel and use water flow for cooling the surface. The rib height-to-hydraulic diameter ratio ( $e/D_h$ ), and the rib pitch-to-height ( $p/e$ ) ratio are equal to 0.18 and 10. The Reynolds number ( $Re$ ) are 400, 800 and 1200. The result found that the 60°V broken ribs is the highest average heat transfer on surface.

**Keywords:** Heat transfer, Water cooling, Ribs, Nusselt number

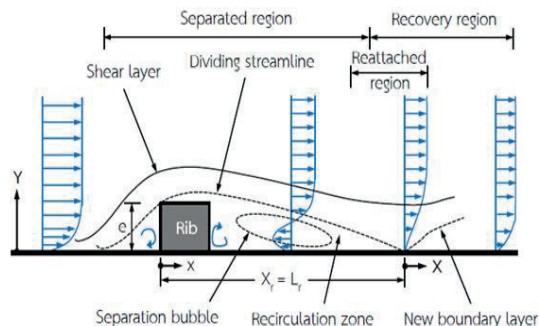
### 1. บทนำ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมากระทบ โดยไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทว่าไปแล้ว แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟอยู่ที่ 15% แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดนั้น จะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณผิวรับแสงและโครงสร้างโลหะ และเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 25 °C (อุณหภูมิทดสอบประสิทธิภาพตามมาตรฐาน STC) จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แนวคิดในการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้ เพื่อลดอุณหภูมิให้กับแผงและนำประสิทธิภาพที่หายไปนั้นกลับคืนมา ตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาด้านนี้ได้แก่ การลดอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผงรับแสงอาทิตย์ด้วยการสร้างฟิล์มกันน้ำ การศึกษาระบบระบายความร้อนแบบบังคับสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอากาศ

นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้วนั้น การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบระบายความร้อนยังเป็นส่วนที่สำคัญ การติดตั้งกลไกการระบายความร้อนด้วยครีบบน เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมาก ซึ่งครีบบน คือส่วนที่ติดตั้งบนพื้นผิวเพื่อวางขวางการไหล ส่วนใหญ่นั้นจะวางขวางการไหลตามแนวราบทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้านหลังบริเวณที่ติดตั้งครีบบนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาการระบายความร้อนโดยใช้ครีบบน การไหลของของไหลที่ผ่านครีบบนทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบบน และเกิดการไหลหมุนวนจนเกาะติดผนังมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาชั้นขอบเขตก่อนข้างมาก

โดยปกติการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบบนจะขึ้นอยู่กับความสูงของครีบบน (Rib height) ระยะห่างระหว่างครีบบน (Pitch) มุมการติดครีบบน (Rib Angle) รูปแบบหน้าตัดของครีบบน (Rib profile) และช่องทางไหลของครีบบน (Rib channel) ตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน

นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ยังขึ้นอยู่กับระยะการไหลเกาะติดกับผนัง (Reattachment length,  $L_r$ ) ดังแสดง ในรูปที่ 1 ตำแหน่งการไหลเกาะติดกับผนัง จะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง



รูปที่ 1 โครงสร้างการไหลผ่านครีบอกการถ่ายเทความร้อน [1]  
การศึกษาที่เกี่ยวกับการติดตั้งครีบอกและช่องการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการระบายความร้อน Webb และคณะ [2] ได้ทำนายผลของรูปแบบการไหลตามแนวกระแสของครีบอกที่ระยะพิทต่อความสูงครีบอก ( $p/e$ ) ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าในกรณีที่มีระยะพิทต่อความสูงครีบอกต่ำ ( $p/e < 5$ ) จะเกิดการไหลแยกตัวที่ด้านหลังของครีบอกตัวแรกและหมุนวนขึ้นระหว่างครีบอกทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะพิทต่อความสูงครีบอกต่ำ จะไม่ก่อให้เกิดระยะการไหลเกาะติดผนัง (Reattachment length) แต่ในทางตรงข้าม หากระยะพิทต่อความสูงครีบอกเพิ่มขึ้น จะเกิดการไหลแยกตัวหมุนวนด้านหลังครีบอกตัวแรกและเกิดระยะการไหลเกาะติดบริเวณผนังด้วย นอกจากนี้จากการทดสอบยังพบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ระยะพิทต่อความสูงครีบอกประมาณ 10 สำหรับช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Park และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล ( $W/H$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ในการทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล ( $W/H$ ) ที่ด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 0.037-0.0725 kg/s ทั้งที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแผงโมดูลนั้นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น โดยได้ทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 998.10-1186.82 W/m<sup>2</sup> โดยได้ผลว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเมื่อมีการระบายความร้อนนั้น มีค่าสูงกว่ากรณีแผงโมดูลปกติถึงร้อยละ 24 ซึ่งคล้ายกับผลของการตัดครีบอกที่มุม 45° และ 90° โดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลน้อย จะได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลที่มากยกเว้นที่ครีบอกทำมุม 30° จะให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และความดันลดที่เพิ่มขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับครีบอกมุมอื่นๆ

จากงานวิจัยที่กล่าวมานำเสนอในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการพัฒนากลไกการระบายความร้อนด้วยครีบอกนั้น ยังไม่มีการใช้น้ำเป็นการไหลร่วมกับกลไกการระบายความร้อนด้วยครีบอก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น เพื่อหารูปแบบ

0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 โดยตัดครีบอกทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สจำนวน 30,000 จากผลการทดลองพบว่า การตัดครีบอกทำมุม 60° ค่าการถ่ายเทความร้อนนั้นไม่มีนัยสำคัญมาก แต่ค่าความดันลดนั้นเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก (0.25 ถึง 4)

E.Skoplaki และ J.A. Palyvos [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพลังงาน พบว่าอุณหภูมินั้นมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการแปลงไฟฟ้า และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจากความเข้มของแสงอาทิตย์ จะทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่แผงโมดูล โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของอากาศ และสภาพแวดล้อม เป็นต้น

Stefon krauter และคณะ [5] ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทดสอบปล่อยน้ำให้ไหลผ่านบริเวณผิวรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมเดล M 55 จำนวน 2 แผง เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์วงจรเปิดและกำลังและกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน วางเรียงทำมุมตามละติจูดของพื้นที่ (23 องศาเหนือ) วัดค่าความเข้มแสงในระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปล่อยน้ำด้วยหัวฉีดจำนวน 12 หัว ที่ติดตั้งอยู่เหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราการไหล 2 LPM ให้กระจายน้ำเป็นฟิล์มบางประมาณ 1 mm ปรากฏว่าสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ทำงานได้มากถึง 22 °C และผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 10.3% ต่อวัน

อิสระพงศ์และคณะ [6] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์เชิงพาณิชย์ ขนาดของแผง 0.99 m x 1.96 m ทำการตัดครีบอกมุมเฉียงได้แผงและใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในช่องใต้แผงที่หุ้มฉนวน

การตัดครีบอกในช่องการไหลแบบขนานที่ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

## 2. โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

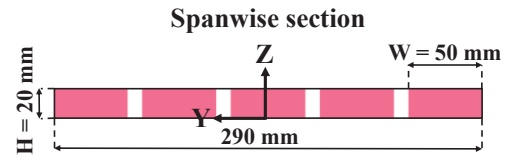
### 2.1 โมเดลการติดตั้งครีบอกบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 2 แสดงส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการติดตั้งครีบอกแบบต่างๆ ในช่องการไหลแบบขนาน เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อน โดยอัตราส่วนและตัวแปรที่ใช้ศึกษาจะแสดงใน ตารางที่ 1

## 2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

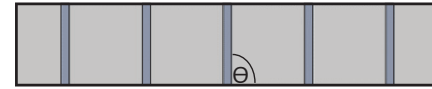
ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
1. อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล	W/H	2.5
2. เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล	$D_h$	0.028 m
3. ความยาวของช่องการไหล	L	0.26 m
4. อัตราส่วนความสูงครีบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก	$e/D_h$	0.18
5. อัตราส่วนระยะพิทต่อความสูงครีบอก	$p/e$	10
6. ค่าเรย์โนลด์สสัมบูรณ์เบอร์ (อัตราการไหล)	Re (Q)	400, 800, 1200 (4, 8, 12 LPM)
7. ค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่	$q'$	300 W/m <sup>2</sup>
8. อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าส่วนทดสอบ	$T_i$	25.0 °C
9. อุณหภูมิห้องทดสอบ	$T_{am}$	25.0 °C
10. รูปแบบครีบอก		ครีบอกมุม 90°, ครีบอกเอียงมุม 60°, ครีบอกตัววีมุม 60°, ครีบอกเอียงมุม 60° แบบแตก, ครีบอกตัววีมุม 60° แบบแตก

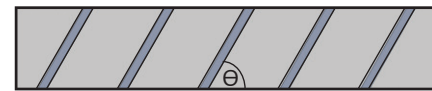


(ข) ภาพด้านหน้า

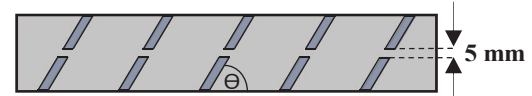
รูปที่ 2 การติดตั้งครีบอกในช่องการไหลแบบขนาน



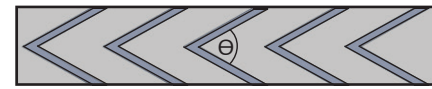
ครีบอก มุม 90°



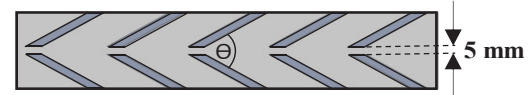
ครีบอกเอียง มุม 60°



ครีบอกเอียง มุม 60° แบบแตก

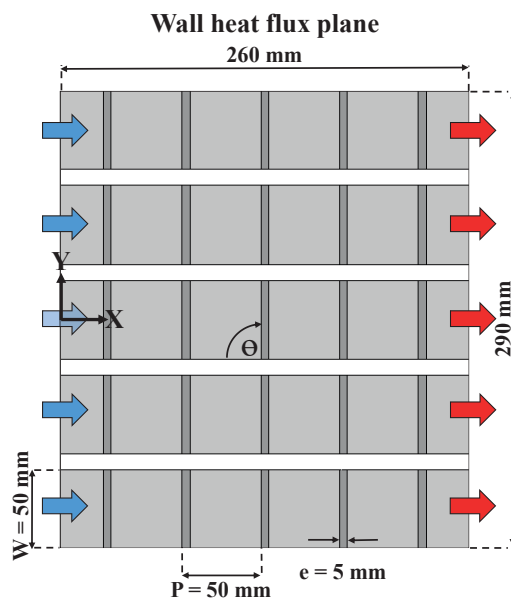


ครีบอกตัววี มุม 60°



ครีบอกเอียง มุม 60° แบบแตก

รูปที่ 3 รูปแบบครีบอกที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

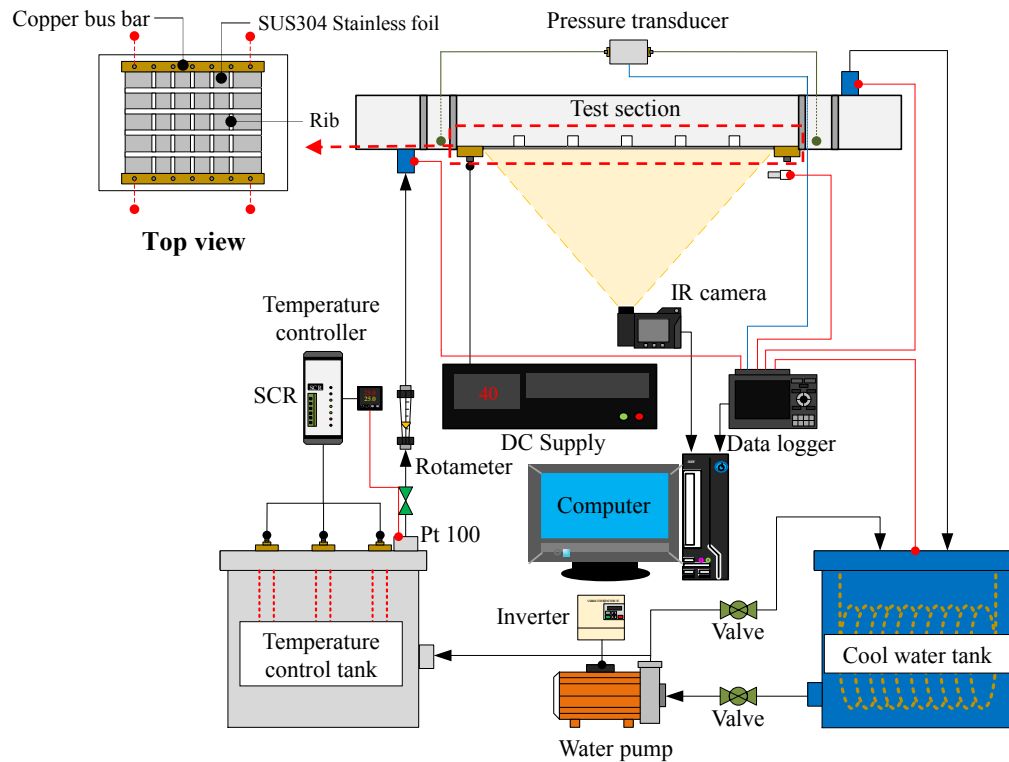


(ก) ภาพด้านบน

### 3. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

#### 3.1 ชุดทดลอง

แผนภาพชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วยส่วนทดสอบ (Test section) ทำจากแผ่นอะคริลิกใส ประกอบเข้าด้วยกัน 3 ชั้น ภายในมีลักษณะเป็นกล่องที่มีหน้าตัดขนาด 440 mm x 20 mm และมีความยาวของกล่องที่ 890 mm ซึ่งภายในสามารถให้น้ำไหลผ่านได้



รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อน

ชั้นล่างของส่วนทดสอบได้มีการติดแผ่นสแตนเลส (SUS 304) ความหนา 0.1 mm เพื่อเป็นบริเวณที่ถ่ายเทความร้อน โดยด้านหนึ่งของแผ่นสแตนเลสที่ศึกษา มีการติดตั้งช่องการไหลแบบขนาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ช่องด้วยกัน โดยแต่ละช่องมีหน้าตัดแต่ละช่องที่ 50 mm x 20 mm ความยาวที่ 260 mm ภายในช่องการไหลจะมีการติดตั้งครีบบางๆ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน ผังอีกด้านหนึ่งของแผ่นสแตนเลส (ด้านนอก) ถูกพ่นด้วยสีดำด้านเพื่อช่วยในการถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรดและลดการแผ่รังสีความร้อน แท่งทองแดงแบน (Bus bar) ขนาด 25 mm x 400 mm x 5 mm ถูกใช้ในการขึงแผ่นสแตนเลสและเป็นชั้นทางไฟฟ้าสำหรับสร้างฟลักซ์ความร้อน

ระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำ (Temperature controller) เป็นระบบที่ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าส่วนทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยถังบรรจุน้ำ ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กหนา 3 mm มีปริมาตรความจุที่ 36 L ภายในติดตั้งฮีตเตอร์กำลังไฟรวม 4500 W ทางน้ำออกของถังบรรจุน้ำติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ ชนิด Pt 100 เชื่อมต่อเข้าไปยัง Temperature control unit เพื่อควบคุมอุณหภูมิ น้ำให้ได้ 25 °C ก่อนส่งไปยังส่วนทดสอบ ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Rotameter) ไปยังส่วนทดสอบ ระบบทำความเย็น (Cool water unit) เป็นระบบที่ใช้เตรียม น้ำเย็นที่อุณหภูมิ 23 °C ก่อนส่งไปยังระบบควบคุมน้ำ โดยปั๊ม

น้ำ (Water pump) ขนาด 0.5 HP ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วย ถังน้ำเย็นขนาด 36 L ซึ่งรับน้ำมาจากทางออกของส่วนทดสอบ ภายในถังน้ำเย็นบรรจุท่อทองแดง ซึ่งภายในท่อทองแดงนั้นมีน้ำอุณหภูมิ 18 °C ซึ่งมาจากเครื่องทำน้ำเย็นไหลเวียนอยู่ และภายในถังน้ำเย็นนั้น ได้ติดตั้งปั๊มน้ำขนาดเล็ก (20 W) เพื่อใช้ในการหมุนเวียนน้ำในถัง โดยถังน้ำเย็นนี้ ได้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ ชนิด Pt 100 ไว้ด้วยเช่นกัน

ระบบสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่ จะสร้างฟลักซ์ความร้อนให้เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส (ชั้นล่างของส่วนทดสอบ) ซึ่งจะประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังแท่งทองแดงที่ใช้ขึงแผ่นสแตนเลส

กล้องอินฟราเรด (IR camera) มีช่วงการวัดระหว่าง -20 ถึง 650 °C ความไวในการจับภาพ 0.01 s และมีความละเอียดภาพที่ 320 x 240 pixels ถูกใช้ในการถ่ายภาพการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลส โดยกำหนดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity coefficient) ของแผ่นสแตนเลสที่ 0.9 หัววัดอุณหภูมิ ชนิด Pt 100 ใช้ในการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า-ออก ส่วนทดสอบ ท่อทางออกถึงเก็บน้ำของระบบควบคุมอุณหภูมิ น้ำ ท่อทางออกถึงน้ำเย็นและอุณหภูมิห้องทดลอง ซึ่งข้อมูลจาก Pt 100 ดังกล่าวจะถูกเก็บโดยใช้ Data logger และวัดค่าการสูญเสียความร้อนโดยใช้ Pressure Transducer

### 3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C จะไหลผ่านวาล์วและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 4, 8 และ 12 LPM ในทุกรูปแบบของการติดตั้งครีบ เมื่อน้ำเข้าสู่ส่วนทดสอบจะผ่านตะแกรงซึ่งมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm เพื่อให้เกิดการไหลที่สม่ำเสมอ น้ำจะผ่านไปยังส่วนทดสอบที่มีการติดตั้งครีบและช่องการไหลบนผิวของแผ่นสแตนเลส แผ่นสแตนเลสนี้เป็นบริเวณที่มี พลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ 300 W/m<sup>2</sup> ซึ่งเกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (DC supply) เมื่อน้ำไหลผ่านส่วนทดสอบจะกลับเข้าสู่ถังน้ำเย็นซึ่งภายในบรรจุชุดท่อทองแดงที่มีน้ำอุณหภูมิ 18 °C ไหลเวียนอยู่ เกิดการเปลี่ยนความร้อนทำให้น้ำในถังน้ำเย็นมีอุณหภูมิ 23 °C โดยการทดลองจะบันทึกการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลส อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกส่วนทดสอบ อุณหภูมิห้องทดลอง อัตราการไหลของน้ำและค่าการสูญเสียความดัน

### 4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 4.1 สมการที่ใช้ในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังพื้นผิวที่ทำจากแผ่นสแตนเลส บางจะเกิดความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{input} = IV \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดระหว่างแท่งทองแดงที่ซึ่งแผ่นสแตนเลส (V)

จากนั้นจะใช้น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C ไหลผ่านพื้นผิวแผ่นสแตนเลส ที่ติดตั้งระบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว (h) จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_f)} \quad (2)$$

โดยที่  $\dot{Q}_{input}$  คือ อัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสแตนเลส จากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (W)

$\dot{Q}_{losses}$  คือ อัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผิวด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (W)

A คือ พื้นที่ของแผ่นสแตนเลส (m<sup>2</sup>)

T<sub>w</sub> คือ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่แสดงบนแผ่นสแตนเลส (°C)

T<sub>f</sub> คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและออกส่วนทดสอบ (°C)

จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าตัวเลขนัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) บนพื้นผิวได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

โดยที่ D<sub>h</sub> คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ (W/m·k)

และสามารถคำนวณค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ของการไหลในส่วนทดสอบได้จากสมการ

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (4)$$

โดยที่ V คือ อัตราเร็วการไหลของน้ำ (m/s)

ν คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Kinematic viscosity ของน้ำ (m<sup>2</sup>/s)

สำหรับการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนนั้นจะเปรียบเทียบจากอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวเลขนัมเบอร์ต่อผลอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานบนพื้นผิว ซึ่งเรียกว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดังสมการ

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (5)$$

โดยที่ Nu คือ ค่าตัวเลขนัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบ

Nu<sub>0</sub> คือ ค่าตัวเลขนัมเบอร์บนพื้นเรียบ (ไม่มีครีบ)

f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวที่ติดตั้งครีบ ซึ่งสมการคำนวณได้จาก

$$f = \frac{2(\Delta P)(D_h)}{\rho u^2 L} \quad (6)$$

โดยที่ ΔP คือ ค่าความดันลดที่วัดระหว่างทางเข้า-ออก ส่วนทดสอบ

f<sub>0</sub> คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวเรียบ (ไม่มีครีบ)

#### 4.2 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Shear stress transport k-ω model (SST k-ω) ซึ่ง ได้รวมเอาแบบจำลอง 2 ชนิดผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างการจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε model สำหรับการคำนวณการไหลที่ไกลจากผนัง (Outer layer) และการจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ω model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นชิดผนัง (Inner layer)



#### 4.3 การเปรียบเทียบการจำลองการไหลกับการทดลอง

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ติดครีบบุม 90° ระหว่างการจำลองการไหล(ซ้าย) และการทดลอง(ขวา) ที่ค่าเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ 400 พบว่าการจำลองการไหลและการทดลองให้ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่คล้ายคลึงกันแต่การทดลองให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด SST k- $\omega$

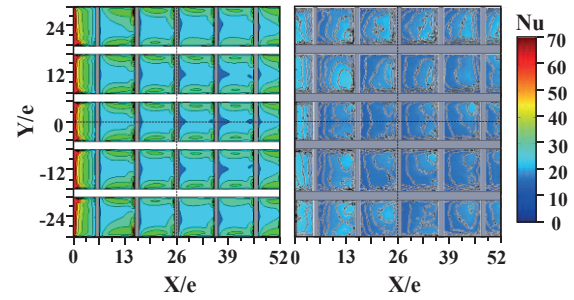
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดตามแนวกระแสรไหล(X/e) ที่ตำแหน่ง Y/e = 0 ของครีบบุม 90° ระหว่างการจำลองการไหลและการทดลอง ที่เรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ 400 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด SST k- $\omega$  ให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดที่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- $\omega$  ในการอธิบายการไหลและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่เกิดขึ้น

#### 5. ผลการทดลอง

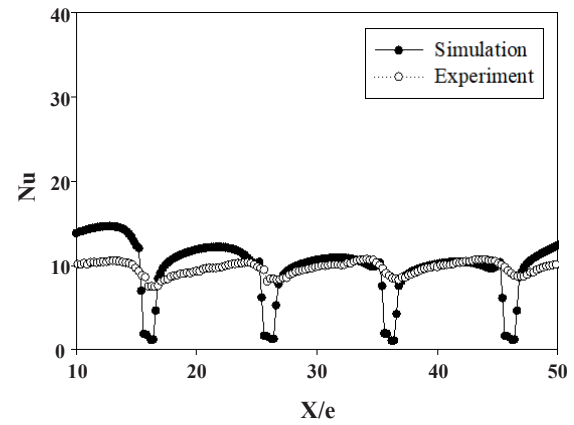
รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุด (Nu) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของรูปแบบการติดตั้งครีบบุม ได้แก่ ครีบบุม 90°, ครีบบึงมุม 60°, ครีบบึงมุม 60° แบบแตก, ครีบบตัววีมุม 60°, และ ครีบบตัววีมุม 60° แบบแตก ตามลำดับที่ค่าเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ (Re) 400, 800 และ 1200 ตามลำดับ หากพิจารณาที่ Y/e = -5 ถึง 5 จากการทดลองที่ทุกค่าเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ พบว่าการติดตั้งครีบบุม 90° การกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงบริเวณตรงกลางระหว่างครีบบึงทั้งสอง ในขณะที่การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของการติดตั้งครีบบึงมุม 60° จะเพิ่มขึ้นใกล้บริเวณก่อนขอบกระแสรไหล (Upstream edge) ที่ระยะตามแนวขวางการไหล Y/e น้อยกว่า 0 เนื่องจากเกิดการไหลอันติบสองเหนี่ยวน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากมุมเอียงของรูปแบบการติดตั้งครีบบึง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น และจะลดลงบริเวณปลายขอบกระแสรไหล (Downstream edge) ของการติดตั้งครีบบึง ตามแนวขวางการไหล Y/e มากกว่า 0

ผลของการติดตั้งครีบบึงตัววีมุม 60° พบว่าการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์จะสูงบริเวณตรงกลางช่องการไหล (Y/e = 0) ระหว่างครีบบึงหน้าและหลังและค่อยๆลดลงบริเวณใกล้ขอบของช่องการไหล (Y/e = -5,5) อันเป็นผลมาจากคูการไหลวนสวนทางกัน เหนี่ยวน้ำให้การไหลที่มีความเร็วสูงเหนือครีบบึงปะทะกับพื้นผิวตรงกลางช่องการไหล

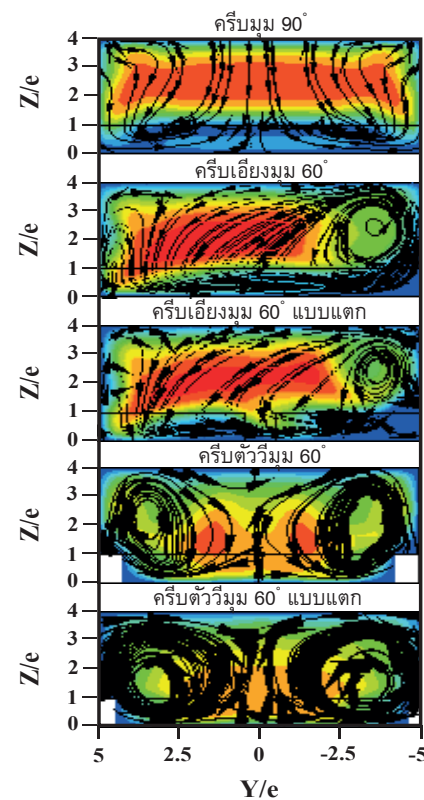
ผลของการติดตั้งครีบบึงแบบแตก พบว่าในการทดลองที่เรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ต่ำไม่ค่อยส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ แต่เมื่อเพิ่มเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ให้สูงขึ้น กลับพบว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจเป็นผลจากการไหลผ่านครีบบึงสนุนคูการไหลวนเหนี่ยวน้ำให้รุนแรงขึ้น



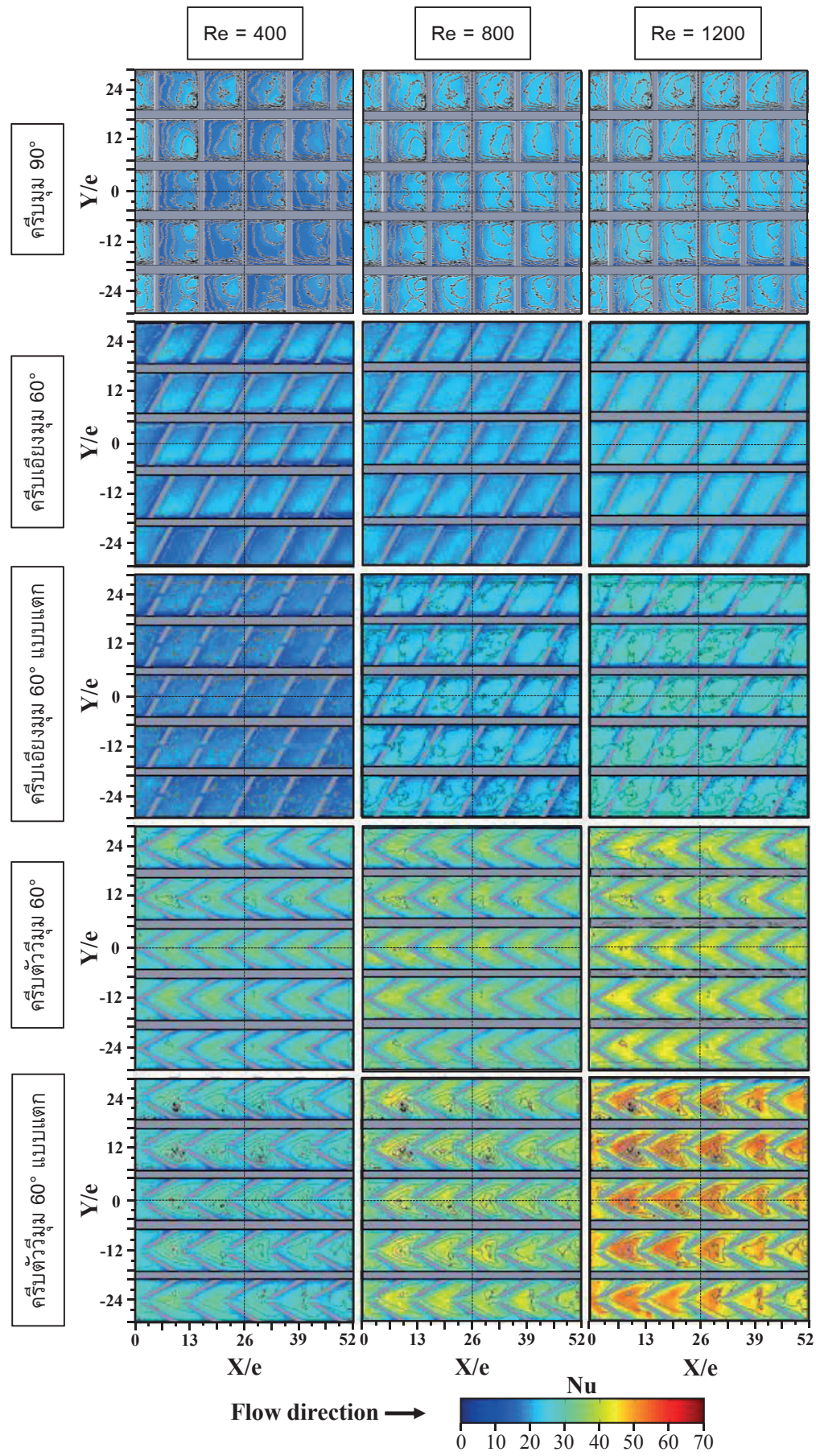
รูปที่ 5 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ของครีบบุม 90° ระหว่างการจำลองการไหล(ซ้าย)และการทดลอง(ขวา) ที่ Re = 400



รูปที่ 6 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุด ที่ตำแหน่ง Y/e = 0 ของครีบบุม 90° ระหว่างการจำลองการไหลและการทดลอง ที่ Re = 400

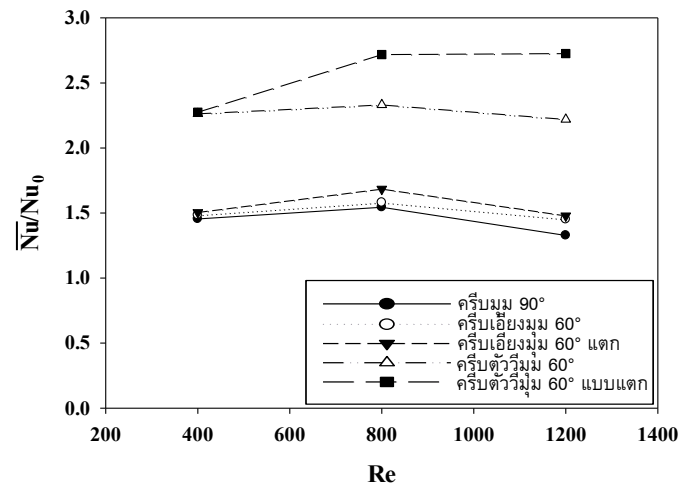


รูปที่ 7 อัตราส่วนความเร็ว และ เวกเตอร์เส้นการไหลของการติดตั้งครีบบึงแต่ละรูปแบบ ที่ Re = 400

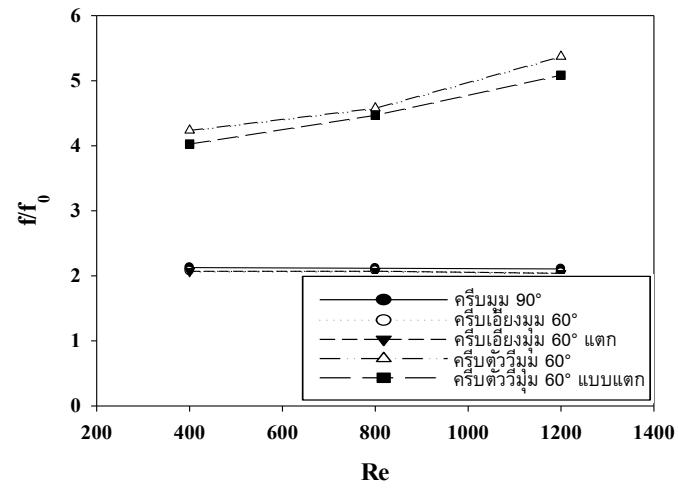


รูปที่ 8 การกระจายของค่าหัดเซิลต์นัมเบอร์ (Nu) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของการติดครีบแต่ละรูปแบบ ที่ Re = 400, 800 และ 1200

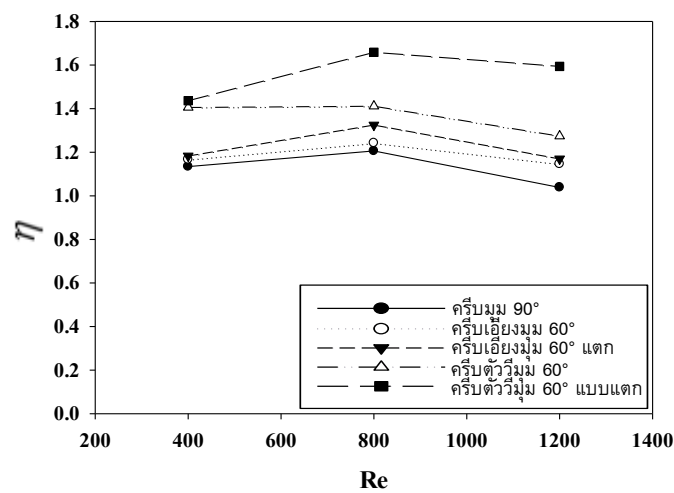




รูปที่ 9 อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวของการติดครีบบวมแต่ละรูปแบบ ที่  $Re = 400, 800$  และ  $1200$



รูปที่ 10 อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการติดครีบบวมแต่ละรูปแบบ ที่  $Re = 400, 800$  และ  $1200$



รูปที่ 11 สมรรถนะเชิงความร้อนของการติดตั้งครีบบวมรูปแบบต่างๆ ที่  $Re = 400, 800$  และ  $1200$

รูปที่ 9 แสดงอัตราส่วนนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว ถ่ายเทความร้อนของการติดครีบบนแต่ละรูปแบบ ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ 400, 800 และ 1200 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การติดครีบบนรูปแบบครีบบั้ววีมุม 60° แบบแตงนั้น ให้ค่าอัตราส่วนนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงที่สุด โดยจะเห็นได้ชัดเจนนขึ้นในกรณีที่เพิ่มเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ให้สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากคูการไหลวนสวนทางกันเหนี่ยวนำการไหลให้มีความเร็วสูงเหนือครีบบั้วปะทะกับพื้นผิวตรงกลางช่องการไหล และการไหลผ่านครีบบั้วสนับสนุนคูการไหลวนให้รุนแรงขึ้นในช่วงที่เรย์โนลด์ส นัมเบอร์สูงขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 10 แสดงอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการติดครีบบนแต่ละรูปแบบที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ 400, 800 และ 1200 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การติดครีบบนรูปแบบครีบบั้ววีมุม 60° ให้ค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เดียวกัน

รูปที่ 11 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของการติดครีบบนแต่ละรูปแบบ ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ 400, 800 และ 1200 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ พบว่าการติดครีบบั้ววีมุม 60° แบบแตงให้สมรรถนะทางความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการติดครีบบนรูปแบบอื่นๆ ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เดียวกัน และหากพิจารณาเฉพาะครีบบั้ววีมุม 60° แบบแตงนั้น จะพบว่าที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ 800 ให้สมรรถนะทางความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วนนัสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่ค่อนข้างสูงและอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ

## 6.สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการติดครีบบนต่อการกระจายความร้อนบนพื้นผิว โดยใช้หน้าเป็นของไหลระบายความร้อน ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1.การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของรูปแบบการติดครีบบั้ววีมุม 60° แบบแตง ให้ค่าสูงที่สุดและสูงกว่าการติดครีบบั้ววีมุม 90° ประมาณ 50 ถึง 80 % เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เดียวกัน

2.สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวที่ของการติดครีบบั้ววีมุม 60° มีค่าสูงที่สุดโดยคิดเป็น 2 ถึง 2.5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนพื้นผิวของการติดครีบบั้ววีมุม 90° ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เดียวกัน

3.สมรรถนะเชิงความร้อนของการติดครีบบั้ววีมุม 60° แบบแตงให้ค่าสูงสุด ที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ 800 (เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่า)

## 7.กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่ในการทำวิจัยและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

## 8.เอกสารอ้างอิง

[1] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T., (1998), "The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel." ASME Journal of Turbomachinery, vol. 120, pp. 368-375.

[2] Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R.J., (1971), "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness," International Journal of Heat Mass Transfer, vol. 14, pp. 601-617.

[3] Gas Turbine Heat transfer and cooling Technology 2nd Edition ชื่อผู้เขียน Je-Chin Han, Sandip Dutta และ Srinath Ekked สำนักพิมพ์ Taylor & Francis Group, USA, pp372-375.

[4] E. Skoplaki and J.A. Palyvos (2009). "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations". Renewable Energy 34. (23-29).

[5] Stefan Krauter (2004) "Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels". Solar Energy Materials & Solar Cells. 82: 131-137

[6] อิศระ พงศ์ กันธิยะ และคณะ (2015). "การเพิ่มประสิทธิภาพและลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดครีบบั้วโดยระบายความร้อนด้วยอากาศ". การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 14: 455-460.

ภาคผนวก ฉ.

บทความสำหรับเผยแพร่ที่ 3

การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน  
โดยใช้เทคนิคเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน



# การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้า และความร้อนโดยใช้เทคนิคเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน

## Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels by Using Heat Transfer Augmentation

ธนากรณ์ สุขกะโต<sup>1</sup> มัถการ เวหะยี<sup>1</sup> จันทกานต์ ทวีกุล<sup>1</sup> อิบรอเฮ็ง ปิยา<sup>2</sup>

นีโอะ ปูซุ<sup>2</sup> ปริญญา พานิชย์<sup>2</sup> และ ชยุต นันทดุสิต<sup>1,\*</sup>

Tanakorn Sukkato<sup>1</sup>, Makatar Wae-hayee<sup>1</sup>, Juntakan Taweekun<sup>1</sup>, Ibroheng Piya<sup>2</sup>,  
Nioh Puzu<sup>2</sup>, Parinya Panich<sup>2</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

<sup>1</sup>Energy Technology Research Center, Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

\*E-mail: chayut.n@gmail.com, Telephone Number: 074-287035-6, Fax Number: 074-558830

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ด้วยการติดตั้ง โมดูลระบายความร้อนเข้ากับด้านหลังของแผง ซึ่ง โมดูลระบายความร้อนนี้มีช่องบังคับการไหลแบบวกกลับและครีบริบสร้างความปั่นป่วนรูปตัววีมุม 45° ติดตั้งอยู่ภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยน้ำที่ไหลผ่านโมดูลระบายความร้อนจะดึงความร้อนที่สะสมออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของแผงลดลงและได้น้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ เรียกระบบดังกล่าวว่า แผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนหรือแผง PV/T ในการทดสอบได้ประเมินประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อนและพลังงานสุทธิที่ผลิตได้จากแผง PV/T เปรียบเทียบกับแผง PV แบบทั่วไปที่สภาวะการใช้งานจริงและกำหนดอัตราการไหลของน้ำในระบบแผง PV/T ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s จากผลการทดสอบพบว่า แผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนที่ 14.20-14.90% และ 40.70-44.30% ตามลำดับและมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแผง PV ที่ใช้อ้างอิงสูงสุดถึง 13.97%

คำสำคัญ: แผง PV/T, ครีบริบสร้างความปั่นป่วน, ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า, ประสิทธิภาพทางความร้อน

### ABSTRACT

This research studied temperature reduction of Polycrystalline silicon photovoltaic panel with the cooling module installed at the back panel. Serpentine channel and 45° V-shaped rib turbulators were attached inside the cooling module for enhance heat transfer ability. Water flow inside the cooling module will absorb the accumulated heat in the PV panel and produced hot water for usage. This design was called Photovoltaic/Thermal or PV/T panel. In this experiment, electrical, thermal efficiencies and net energy which produce by PV/T panel were evaluated and compared with normal PV panel at the real conditions for water flow rate of PV/T system are 0.5, 1.0 and 1.5 kg/s. The results showed the

electrical and the thermal efficiencies of the PV/T were 14.20-14.90% and 40.70-44.30% respectively and more electrical power than PV panel about 13.97%

**Keyword:** PV/T panel, Rib turbulator, Electrical efficiency, Thermal efficiency

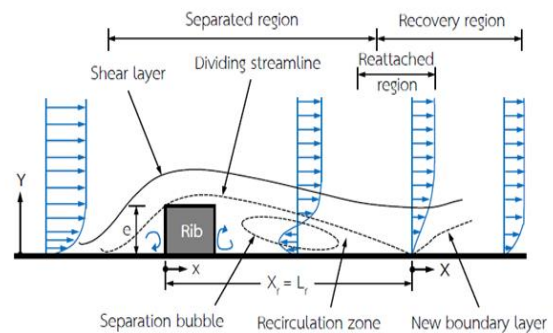
## 1. บทนำ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 15% แต่เนื่องจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงนั้น ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะเกิดขึ้นและสะสมอยู่ในแผง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 25°C (อุณหภูมิทดสอบประสิทธิภาพตามมาตรฐาน STC) จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แนวคิดในการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดอุณหภูมิให้กับแผงและนำประสิทธิภาพที่หายไปนั้นกลับคืนมา ตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาด้านนี้ได้แก่ การลดอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการสร้างฟิล์มน้ำหรือการพ่นละอองน้ำ และการศึกษาระบบระบายความร้อนแบบบังคับสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอากาศ เป็นต้น

นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้วนั้น การติดครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบระบายความร้อนยังเป็นส่วนสำคัญ การติดตั้งกลไกการระบายความร้อนด้วยครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมาก ซึ่งครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นผิวเพื่อวางขวางการไหล ส่วนใหญ่จะวางขวางการไหลตามแนวราบทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้านหลังบริเวณที่ติดตั้งครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนเกิดการพัฒนาระบบระบายความร้อน โดยการใช้ครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของไหลผ่านครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเกิดการไหลหมุนวนเกาะติดผนังมากขึ้นส่งผลต่อการพัฒนาชั้นขอบเขตก่อนข้างมาก

โดยปกติการถ่ายเทความร้อนด้วยการไหลผ่านครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความสูงของครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Rib height) ระยะห่างระหว่างครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Pitch) มุมการติดครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Rib Angle) รูปแบบหน้าตัดของครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Rib profile) และช่องการไหลของครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Rib channel) โดยตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังขึ้นอยู่กับระยะการไหลเกาะติดกับผนัง (Reattachment length,  $L_r$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยตำแหน่งการไหลเกาะติดกับผนังจะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง



รูปที่ 1 โครงสร้างการไหลผ่านครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการระบายความร้อน ได้แก่

Webb และคณะ [2] ได้ทำนายผลของรูปแบบการไหลตามแนวกระแสดังครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระยะพิทต่อความสูงครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (p/e) ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าในกรณีที่มีระยะพิทต่อความสูงครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (p/e < 5) จะเกิดการไหลแยกตัวที่ด้านหลังของครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวแรกและหมุนวนขึ้นระหว่างครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะพิทต่อความสูงครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ก่อให้เกิดระยะการไหลเกาะติดผนัง (Reattachment length) แต่ในทางตรงข้าม เมื่อระยะพิทต่อความสูงครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะเกิดการไหลแยกตัวหมุนวนด้านหลังครีบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวแรก

และเกิดระลอกการไหลเกาะติดบริเวณผนังด้วย นอกจากนี้จากการทดสอบยังพบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะพิทต่อความสูงครีประมาณ 10 สำหรับช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Park และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล (W/H) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ในการทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล (W/H) ที่ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 โดยติดครีทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° ตามลำดับที่ค่าเรย์โนลด์สสัมบูรณ์ 30,000 จากผลการทดลองพบว่า การติดครีทำมุม 60° ค่าการถ่ายเทความร้อนนั้นไม่มีนัยสำคัญมากแต่ค่าความดันลดนั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก (0.25 ถึง 4)

Natthaporn และคณะ [4] ได้ศึกษารูปแบบครีและลักษณะช่องการไหลที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางระบายความร้อน กำหนดอัตราส่วนความสูงครีต่อความสูงช่องการไหล ( $e/D_h$ ) และอัตราส่วนระยะพิทต่อความสูงของครี ( $p/e$ ) ที่ 0.13 และ 10 ตามลำดับ รูปแบบครีที่ใช้ศึกษาได้แก่ ครีแบบเอียงมุม 30° ถึง 90° ครีรูปตัววีและรูปตัววีแบบกลับ มุม 45° และ 60° สำหรับลักษณะช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ช่องการไหลแบบตรงและช่องการไหลแบบวกกลับ เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์สสัมบูรณ์ 30,000 พบว่า ครีรูปตัววีให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีแบบเอียง โดยครีรูปตัววีมุม 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและสูงกว่าครีรูปตัววีมุม 45° เพียงเล็กน้อย ในส่วนของลักษณะช่องการไหลพบว่า ช่องการไหลแบบวกกลับจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าช่องการไหลแบบตรง เนื่องจากการปะทะของของไหลกับผนังในส่วนวกกลับทำให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงของกระแสการไหลส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูง

E.Skoplaki และ J.A. Palyvos [5] ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพลังงาน พบว่าอุณหภูมินั้นมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการแปลงพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์จะทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่แผงโมดูล โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนและสภาพแวดล้อม เป็นต้น

Krauter และคณะ [6] ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทดสอบป้อนน้ำให้ไหลผ่านบริเวณผิวรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมเดล M 55 จำนวน 2 แผง เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์วงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน วางเรียงทำมุมตามละติจูดของพื้นที่ (23° N) วัดค่าความเข้มแสงในระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ป้อนน้ำด้วยหัวฉีดจำนวน 12 หัว ที่ติดตั้งอยู่เหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราการไหล 2 LPM ให้น้ำไหลผ่านเป็นฟิล์มบางประมาณ 1 mm พบว่าสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ทำงานได้มากถึง 22 °C และผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 10.3% ต่อวัน

อิสระพงศ์และคณะ [7] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์เชิงพาณิชย์ ขนาดของแผง 0.99 m x 1.96 m โดยติดครีบอลูมิเนียมได้แผงและใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในช่องใต้แผงที่หุ้มฉนวน ด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 0.037 ถึง 0.0725 kg/s พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของแผงโมดูลนั้นลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น โดยได้ทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 998.10 ถึง 1186.82 W/m<sup>2</sup> ได้ผลว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก โมดูลเมื่อมีการระบายความร้อนนั้น มีค่าสูงกว่ากรณีแผงโมดูลปกติถึง 24%

มันหนา และคณะ [8] ได้ประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สองชนิดที่มีการติดตั้งระบบดูดซับความร้อนไว้ โดยชนิด A เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนและชนิด B เป็นแผงแบบอมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งทั้งสองชนิดนั้นได้ติดตั้งท่อทองแดงที่มีน้ำไหลผ่านในท่อไว้ด้านหลังแผงเพื่อดูดซับความร้อน การทดลองกระทำที่อัตราการไหลของน้ำสองค่าคือ 0.03 และ 0.06 kg/s พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและไฟฟ้าของแผงชนิด A มีค่า 53.22 % และ 10.02 % ตามลำดับและสำหรับชนิด B มีค่า 42.70 % และ 4.57 % ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการระบายความร้อนหลากหลายรูปแบบ อาทิ การระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำด้านหน้าแผง การระบายความร้อนโดยติดชุดท่อทองแดงที่มีน้ำไหลผ่านด้านหลังแผงและการติดช่องบังคับการไหลของอากาศและใช้พัดลมระบายความร้อน โดยการออกแบบที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อสมรรถนะของระบบที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยติดตั้งโมดูลระบายความร้อนด้วยน้ำที่มีช่องการไหลและครีบบอยู่ภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการดึงความร้อน โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อนและพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของระบบแผง PV/T เปรียบเทียบกับแผง PV ในสภาพการใช้งานจริง

## 2. วิธีการวิจัย

เนื่องจากแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือ แผง PV/T เป็นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ผสานเข้ากับโมดูลระบายความร้อน (Cooling module) ที่บริเวณด้านหลังของแผง ทำให้สามารถผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

และน้ำร้อนจากโมดูลระบายความร้อน โดยการคำนวณและวิธีการทดสอบนั้นจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

### 2.1 ทฤษฎีการประเมินสมรรถนะของแผง PV/T

การประเมินความสามารถในการผลิตพลังงานของแผง PV/T นั้นถูกแสดงออกในรูปของประสิทธิภาพขณะ ซึ่งเป็นการคำนวณประสิทธิภาพจากข้อมูลที่ได้จากการวัดค่า ณ เวลานั้นๆ โดยประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T และแผง PV สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{PV} = \frac{P}{I_T \times A_{PV}} \quad (1)$$

ซึ่งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าแผง PV ได้ในบางช่วงเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากน้ำที่กักเก็บไว้ส่งผลต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ที่มีค่าติดลบ หมายถึง การที่เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นลดลง

ในการทำงานเดียวกันประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เนื่องจากค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของชั้นผิวที่เคลือบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงและอีกปัจจัยหนึ่งคือค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorption factor) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวัสดุที่ใช้ในการดูดกลืนรังสีของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{I_T \times A_{PV}} \quad (2)$$

สำหรับการคำนวณพลังงานสุทธิของระบบนั้นจะเป็นผลรวมของพลังงานไฟฟ้าสุทธิและพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้ในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{Net} = E_{el} + E_{th} \quad (3)$$

โดยพลังงานไฟฟ้าสุทธิ ( $E_{el}$ ) ที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{el} = (P - 0.9P_{pump}) \times t \quad (4)$$

โดยที่

$$P_{pump} = \dot{Q} \times \Delta P \quad (5)$$

และสามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากระบบแผง PV/T ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำร้อนจากสมการ

$$E_{th} = mC_p \Delta T \quad (6)$$

เมื่อ  $\eta_{PV}$  คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะ,  $P$  คือ กำลังไฟฟ้าของแผง PV/T หรือ PV (W),  $I_T$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ( $W/m^2$ ),  $A_{PV}$  คือ พื้นที่ผิวรับแสงของแผง PV/T หรือ PV ( $m^2$ ),  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะ,  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ ( $kg/s$ ),  $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ),  $T_{in}$  คือ อุณหภูมิน้ำเข้าโมดูลระบายความร้อน ( $^\circ C$ ),  $T_{out}$  คือ อุณหภูมิน้ำออกโมดูลระบายความร้อน ( $^\circ C$ ),  $E_{Net}$  คือ พลังงานสุทธิที่ผลิตได้ ( $J/day$ ),  $E_{el}$  คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ซึ่งหักพลังงานในการปั๊มน้ำออกแล้ว ( $J/day$ ),  $E_{th}$  คือ พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ ( $J/day$ ),  $t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s),  $P_{pump}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการปั๊มน้ำของระบบแผง PV/T,  $\dot{Q}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำในระบบ PV/T ( $m^3/s$ ),  $\Delta P$  คือ ค่าการสูญเสียความดันของน้ำในระบบแผง PV/T ( $N/m^2$ ),  $m$  คือ มวลของน้ำที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิ และ  $\Delta T$  คือ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ( $^\circ C$ )

## 2.2 ชุดทดสอบแผง PV/T

ชุดทดสอบแผง PV/T ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนขนาด  $1.95 \text{ m} \times 0.99 \text{ m}$  กำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 W จำนวน 2 แผง เพื่อใช้ในการงานวิจัย โดยแผงหนึ่งจะถูกติดตั้งโมดูลระบายความร้อนจำนวน 9 โมดูลที่ด้านหลังของแผง เรียกว่าแผง PV/T และอีกแผงหนึ่งไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ เพื่อใช้เป็นแผงอ้างอิงเรียกว่าแผง PV

โมดูลระบายความร้อน ทำหน้าที่ระบายความร้อนที่สะสมอยู่ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยน้ำจะถูกใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนและนำน้ำร้อนที่ได้ไปใช้งานต่อไป โมดูลระบายความร้อนนี้ทำจากอลูมิเนียมเกรด 5083 ที่มีความหนา 4 mm ภายในโมดูลนั้นเป็นช่องบังคับการไหลแบบวกกลับและมีครีบริบสร้างความปั่นป่วนรูปตัววีมุม  $45^\circ$  ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  และมีอัตราส่วนความสูงครีบริบต่อความสูงช่องการไหลที่ 0.25 ติดตั้งอยู่ในช่องการไหล น้ำที่ไหลในช่องการไหลนั้นจะเกิดความปั่นป่วนทำให้ความสามารถในการดึงความร้อนออกจากแผงนั้นเพิ่มขึ้น

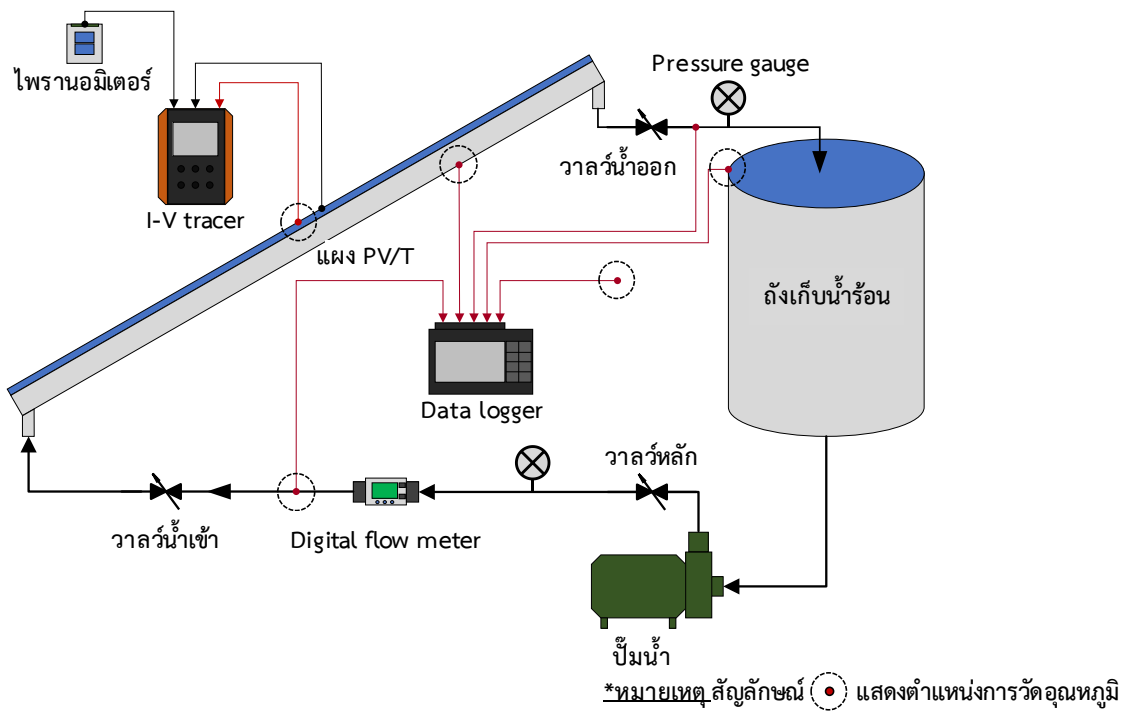
ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อน ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและเก็บน้ำร้อน โดยน้ำจะถูกลำเลียงจากถังเก็บขนาด 200 L ไปยังโมดูลระบายความร้อนด้วยปั๊มน้ำ น้ำจะถูกส่งออกจากปั๊มไปยังท่อน้ำเข้าซึ่งมีวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำให้เท่ากันทุกๆ โมดูล น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะไหลออกจากโมดูลแล้วกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อนด้วยท่อน้ำกลับ

อุปกรณ์วัดและเครื่องมือบันทึกข้อมูล กำลังไฟฟ้าที่แผงทั้ง 2 ผลิตได้ถูกวัด โดยเครื่อง I-V tracer รุ่น I-V400W ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง 1000 W มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 1\%$  ความเข้มแสง ถูกวัดโดย ไพรานอมิเตอร์ รุ่น HT 304 ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง  $1400 \text{ W/m}^2$  มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 3\%$  โดยค่าทางไฟฟ้านี้จะถูกบันทึกทุกๆ 20 นาที

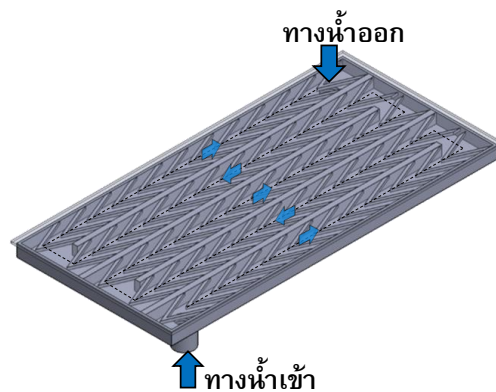


อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ถูกวัดโดย Thermocouple type T ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 40 ถึง 350 °C มีค่าความถูกต้องที่  $\pm 0.5$  °C โดยข้อมูลอุณหภูมิทุกตำแหน่งจะถูกบันทึกลงใน Data logger รุ่น GL820

อัตราการไหลของน้ำ ถูกวัดโดย Digital flow meter รุ่น PF3W711 ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 10 ถึง 100 LPM มีค่าความถูกต้อง  $\pm 3\%$  และวัดค่าการสูญเสียความดัน โดยใช้ Pressure gauge ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 0 ถึง 1 bar โดยแผนภาพชุดทดสอบของแผง PV/T และโมเดลของโมดูลระบายความร้อนที่ถูกติดตั้งได้แสดงดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบของแผง PV/T ที่ติดตั้งครบสร้างความปลอดภัยในโมดูลระบายความร้อน



รูปที่ 3 โมเดลของโมดูลระบายความร้อนซึ่งติดตั้งครบสร้างความปลอดภัยรูปตัววีมุม 45° ในช่องบังคับการไหลแบบวกกลับ

### 2.3 วิธีการทดสอบ

ชุดทดสอบแผง PV/T ถูกติดตั้ง ณ อาคาร ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ซึ่งมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่  $7^{\circ}00'15.6''$  N  $100^{\circ}30'65.4''$  E โดยแผงจะทำมุมเอียง  $7^{\circ}$  กับพื้นราบ ตามละติจูดของพื้นที่ การทดสอบกระทำที่อัตราการไหลของน้ำในระบบแผง PV/T 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ด้วยการปรับวาล์วหลักที่ติดตั้งบริเวณทางออกของปั้มน้ำ โดยทดสอบแต่ละอัตราการไหลตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น.



รูปที่ 4 ชุดทดสอบแผง PV/T

น้ำที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  จะถูกดูดจากถังเก็บน้ำร้อนขนาด 200 L ด้วยปั้มน้ำ 1.5 kW น้ำจะถูกส่งออกจากปั้มน้ำผ่านวาล์วหลักซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ค่า แล้วไหลต่อไปยังท่อรวมน้ำเข้าซึ่งได้แยกออกเป็นท่อน้ำเข้าย่อยๆ 9 ท่อด้วยกัน น้ำที่ผ่านท่อน้ำเข้าจะถูกส่งต่อไปยังโมดูลระบายความร้อนทั้ง 9 โมดูลที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่เข้าสู่โมดูลระบายความร้อนจะไหลในช่องการไหลแบบวงกลับซึ่งติดตั้งครีบสร้างความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่ได้รับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลออกจากโมดูลระบายความร้อนไปยังท่อรวมน้ำขาออกแล้วกลับสู่ถังเก็บน้ำร้อนโดยน้ำจะไหลเวียนภายในระบบตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ สำหรับการวัดค่า กำลังไฟฟ้าจะถูกวัดโดยเครื่อง I-V tracer ค่าความเข้มแสงถูกวัดโดย ไพรานอมิเตอร์ อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผง PV/T, PV

อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บถูกวัดโดย Thermocouple type T และบันทึกค่า Data logger ซึ่งทั้งค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิจะถูกบันทึกทุกๆ 20 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของระบบ	แผง PV/T	แผง PV
<b>เซลล์แสงอาทิตย์</b>		
ชนิด	Poly-Si	Poly-Si
ยี่ห้อ	Full Solar	Full Solar
รุ่น	FAL 300P	FAL 300P
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>		
ขนาด (mm x mm)	1956 x 992	1956 x 992
<b>คุณสมบัติทางไฟฟ้า</b>		
กำลังไฟฟ้าสูงสุด( $P_{MP}$ )	300 W	300 W
แรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด( $V_{MP}$ )	36.19 V	36.19 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด( $I_{MP}$ )	8.29 A	8.29 A
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ )	44.71 V	44.71 V
กระแสไฟฟ้าคัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.88 A	8.88 A
ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ( $\eta_{PV,STC}$ )	15 %	15 %
<b>โมดูลระบายความร้อน</b>		
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>		
ขนาด (mm x mm)	315 x 650	
ความสูง (mm)	20	
วัสดุ	อลูมิเนียม	
ฉนวนกันความร้อน	EDPM	
<b>ปั้มน้ำ</b>		
ยี่ห้อ	MITSURO	
แรงดัน	220 V	
พิกัดกำลังสูงสุด	1.5 kW	

### 3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการทดสอบได้ถูกนำเสนอใน 3 ส่วน คือ ผลของอุณหภูมิภายในระบบกับความเข้มแสงอาทิตย์ ผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงการวัดและผลของประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนชั่วขณะของระบบแผง PV/T และ PV ซึ่งจะถูกแสดงในรูปแบบกราฟเทียบกับเวลา โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 3.1 ผลของอุณหภูมิกับความเข้มแสงอาทิตย์

จากการทดสอบเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิจุดต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผง PV อุณหภูมิแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อน อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและความเข้มแสงอาทิตย์ ทั้ง 3 กรณีที่ทำการทดสอบ ณ อัตราการไหลของน้ำในระบบ PV/T ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า โดยทั่วไปในช่วง 08.00 น. ถึง 15.00 น. ของวันที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยตลอดทั้งช่วง (08.00 - 15.00 น.) ประมาณ 8 ถึง 10 °C และมีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 21 °C ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงที่ความเข้มแสงมีค่าสูง ซึ่งอุณหภูมิของแผง PV จะมีความไวต่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศเป็นอย่างมากเมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศลดลงอย่างกระทันหัน อุณหภูมิของแผง PV ก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน แต่สำหรับแผง PV/T นั้น อุณหภูมิของแผงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการรับแสงซึ่งมีแนวโน้มที่สม่ำเสมอและพบว่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนในระบบแผง PV/T นั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการรับพลังงานแสงอาทิตย์เช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T ลดลง ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้ระบบให้มากขึ้น นอกจากนั้นน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำร้อนต่อไปในตอนกลางวัน

#### 3.2 กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากการนำผลกำลังไฟฟ้าไปแสดงในรูปแบบกราฟกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า โดยทั่วไปแล้วตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง PV/T จะสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 14.3 W และมีค่ามาก

ที่สุดที่ 30 W โดยกำลังไฟฟ้าของทั้งสองแผงนี้จะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงท้ายของการทดสอบซึ่งมีค่าความเข้มแสงและอุณหภูมিবรรยากาศต่ำลงนั้นแผง PV จะคายความร้อนได้เร็วกว่าแผง PV/T เนื่องจากด้านหลังของแผง PV/T ได้มีการหุ้มฉนวนกันความร้อนแต่ถึงกระนั้นก็ไม่ได้ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากนักเพราะจากความเข้มแสงในช่วงท้ายการทดสอบนั้นมีค่าต่ำมาก

#### 3.3 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) พบว่าอุณหภูมิของแผง PV/T นั้นจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV เฉลี่ยตลอดวันที่ 5.7 °C และที่เวลา 11.00 น. นั้นความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดประมาณ 1,150 W/m<sup>2</sup> ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผงอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิของแผง PV/T จะต่ำกว่าอุณหภูมิได้แผง PV ประมาณ 17 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T สูงกว่าแผง PV ประมาณ 1.8 % แต่เมื่อเวลาตั้งแต่ 16.00 น. เป็นต้นไปพบว่า ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมিবรรยากาศนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อุณหภูมิของแผง PV ลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าแผง PV/T แต่ไม่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามากนักเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทั้งสองแผงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 1.0 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) พบว่า อุณหภูมิของแผง PV/T มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 6.8 °C และเมื่อพิจารณาที่เวลา 13.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 1,050 W/m<sup>2</sup> พบว่า แผง PV/T มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ถึง 18.4 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T นั้นสูงกว่าแผง PV 1.6 % แต่ตั้งแต่วเวลา 15.00 น. เป็นต้นไปพบว่า ความเข้มแสงจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและตั้งแต่วเวลา 16.00 น. เป็นต้นไปนั้น แผง PV มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV/T แต่ก็ไม่ได้ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเช่นกัน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 1.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ค) พบว่าอุณหภูมิของแผง PV/T มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV เฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 4.6 °C และหากพิจารณาในช่วงเวลา 12.20 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงประมาณ 1000 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิของแผง PV/T นั้นจะต่ำกว่าแผง PV ประมาณ 10 °C ทำให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T สูงกว่าแผง PV 1.7 %

เนื่องด้วยการทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน มีค่าความเข้มแสงที่ไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหลได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพที่แตกต่างกันระหว่างแผง PV/T และแผง PV ที่ทดสอบในวันเดียวกันเท่านั้น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะของแผง PV/T โดยคำนวณจากสมการที่ 2 กับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า การทดสอบทุกอัตราการไหลของน้ำ ประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงในช่วงเริ่มต้นการทดลองและจะลดลงตามระยะเวลาในการรับความร้อนจากแผง PV/T และอุณหภูมิในถังที่เพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยต่อๆกันจะทำการเพิ่มปริมาณน้ำในระบบแผง PV/T เพื่อชะลอการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง PV/T กับแผง PV ที่ทุกๆ อัตราการไหลทดสอบพบว่า แผง PV/T จะให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันสูงกว่าแผง PV เนื่องจากอุณหภูมิของแผงที่ต่ำกว่า นอกจากนั้นแผง PV/T ยังสามารถนำพลังงานความ

ร้อนมาใช้ในรูปของน้ำร้อนได้อีกด้วยซึ่งมีประสิทธิภาพทางความร้อนดังตารางที่แสดงไว้ข้างต้น

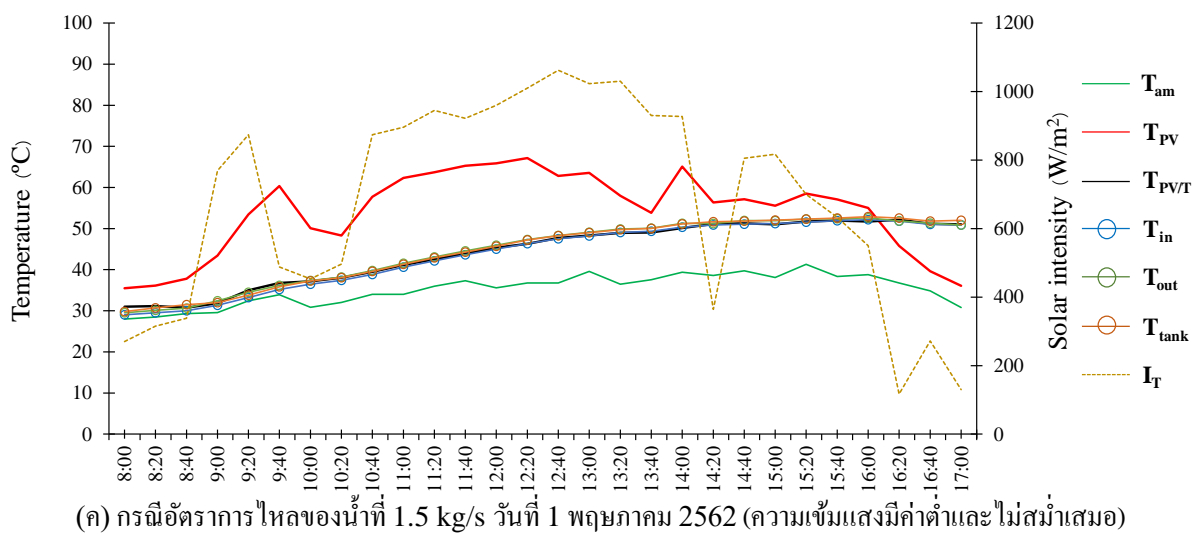
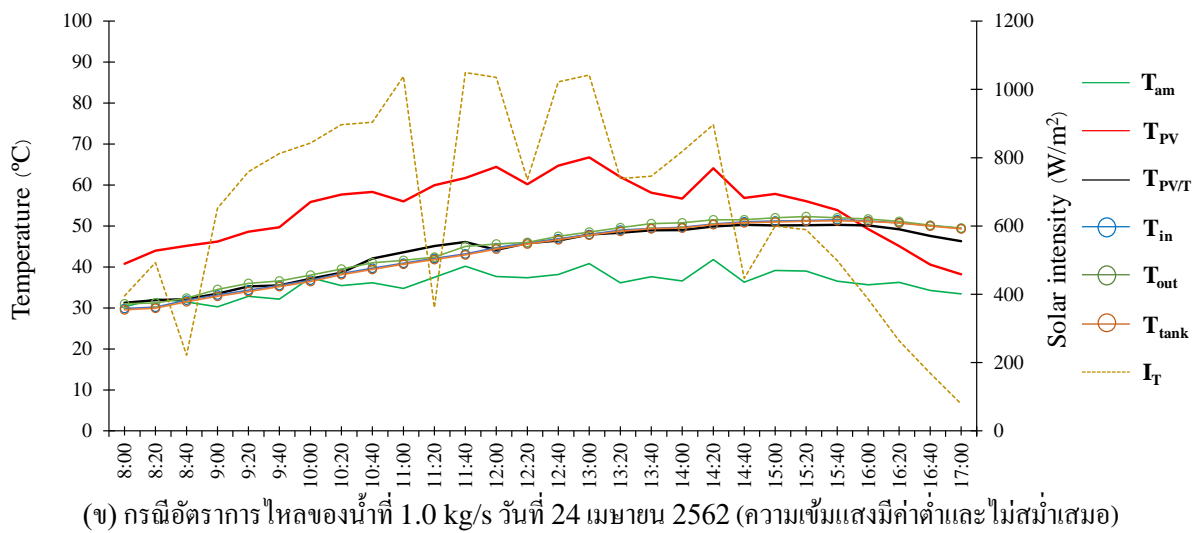
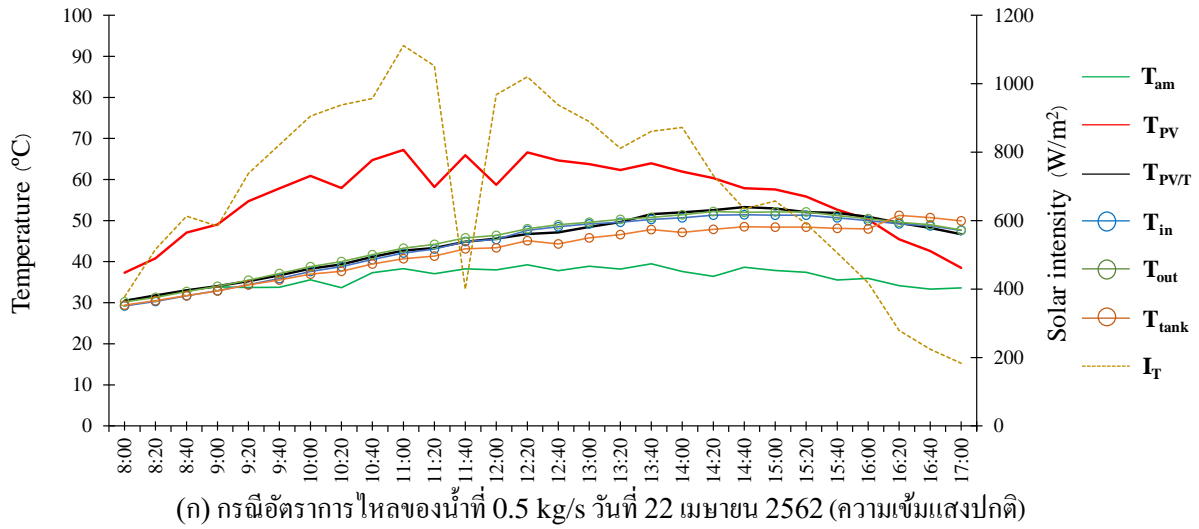
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง PV และ PV/T (หน่วย: %)

m <sup>•</sup> (kg/s)	I <sub>T,avg</sub> (W/m <sup>2</sup> )	PV	PV/T	
		$\eta_{PV}$	$\eta_{PV}$	$\eta_{th}$
0.5	700	13.40	14.20	42.50
1.0	660	13.00	14.50	44.30
1.5	678	12.00	14.90	40.70

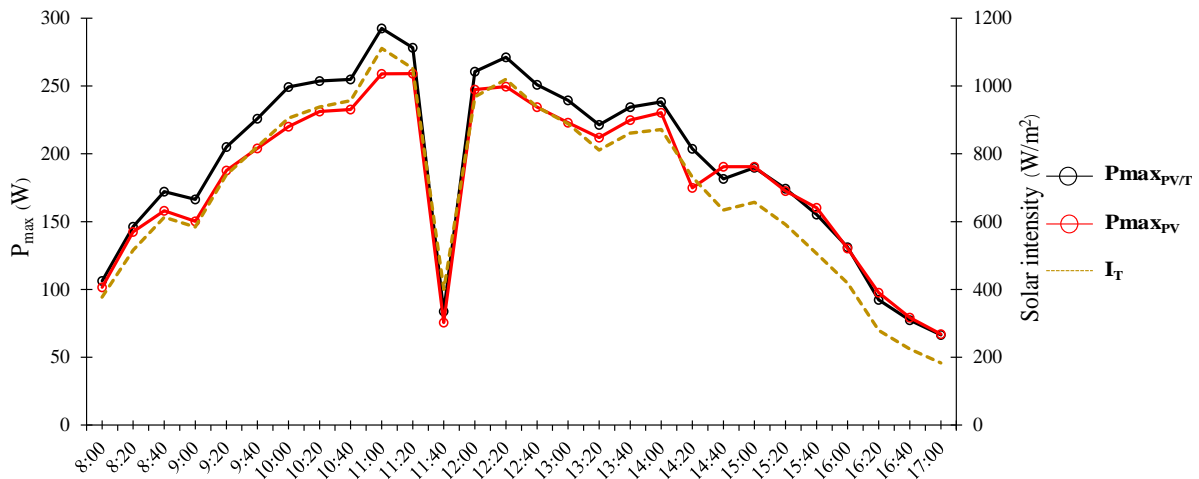
จากข้อมูลการทดสอบของแผง PV และ PV/T ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันของแผง PV และ PV/T จากค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาและคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ของแผง PV/T จากอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ ด้วยสมการที่ 3 ถึง 6 พบว่า การทดสอบทั้ง 3 กรณีมีค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าของแผง PV และ PV/T เท่ากับ 5.51 MJ/day และ 5.95 MJ/day ตามลำดับและค่าเฉลี่ยพลังงานความร้อนของแผง PV/T เท่ากับ MJ/day โดยค่าพลังงานของทั้ง 3 กรณีที่ทดสอบนั้นดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลค่าพลังงานที่ผลิตได้จากแผง PV/T และแผง PV (หน่วย: MJ/day)

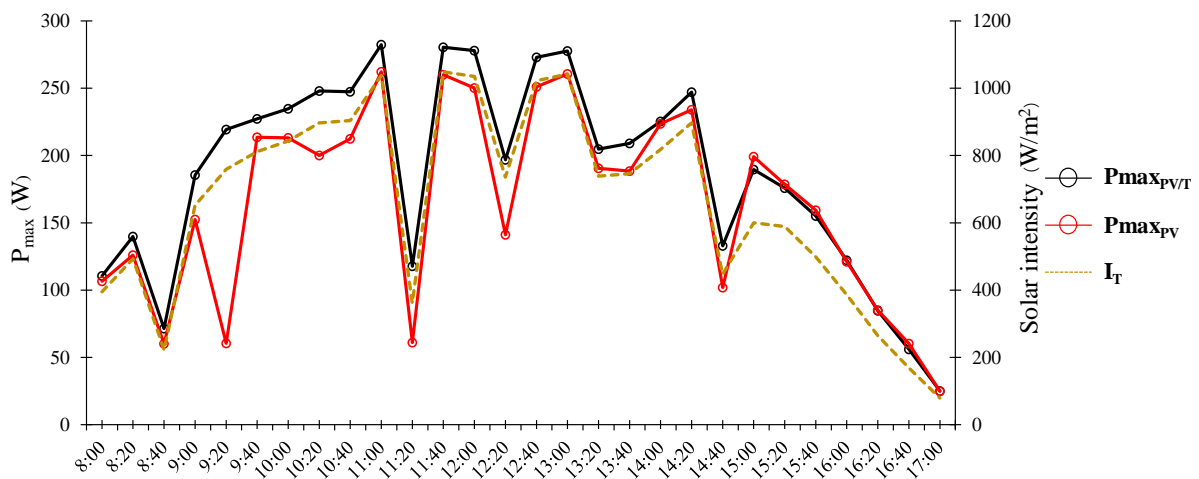
m <sup>•</sup> (kg/s)	I <sub>T,avg</sub> (W/m <sup>2</sup> )	PV	PV/T		
		$E_{el}$	$E_{el}$	$E_{th}$	$E_{Net}$
0.5	700	5.87	6.24	17.56	23.80
1.0	660	5.32	5.93	16.55	22.48
1.5	678	5.33	5.67	18.39	24.60



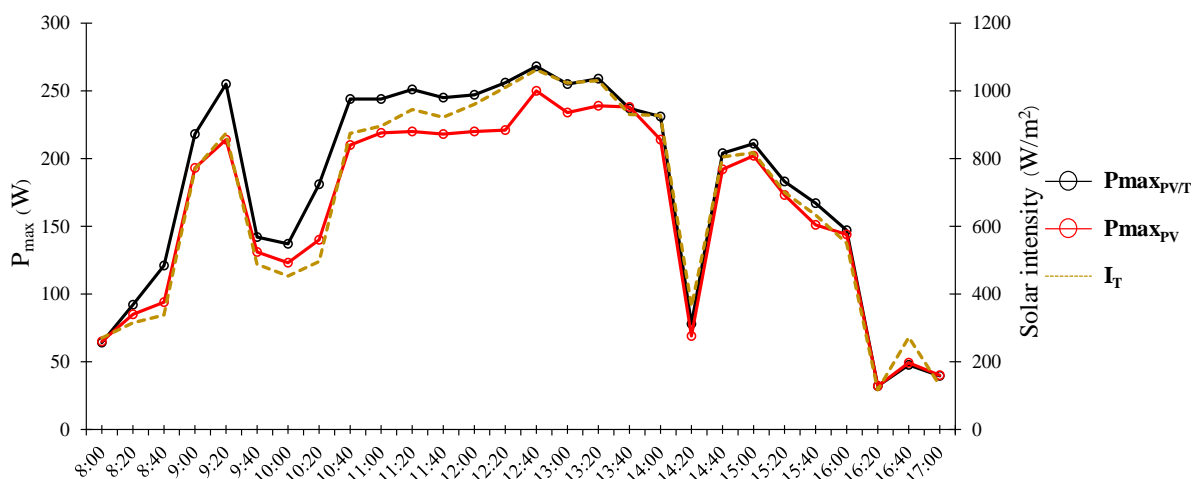
รูปที่ 5 กราฟอุณหภูมิบรรยากาศ ( $T_{amb}$ ), อุณหภูมิแผง PV ( $T_{PV}$ ), อุณหภูมิแผง PV/T ( $T_{PV/T}$ ), อุณหภูมิน้ำเข้าโมดูลระบายความร้อน ( $T_{in}$ ), อุณหภูมิน้ำออกโมดูลระบายความร้อน ( $T_{out}$ ), อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{tank}$ ) และความเข้มแสงอาทิตย์ ( $I_T$ )



(ก) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)

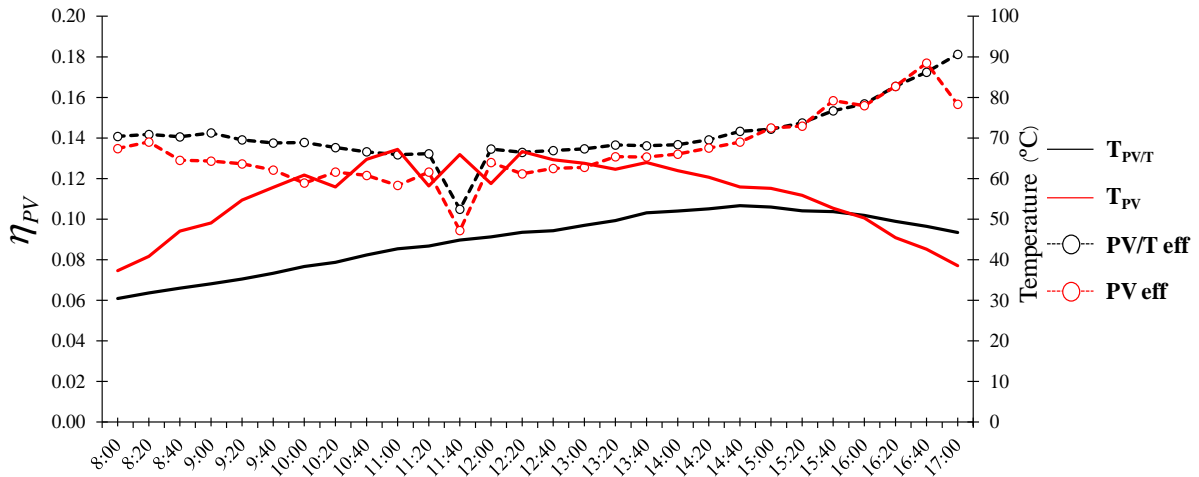


(ข) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

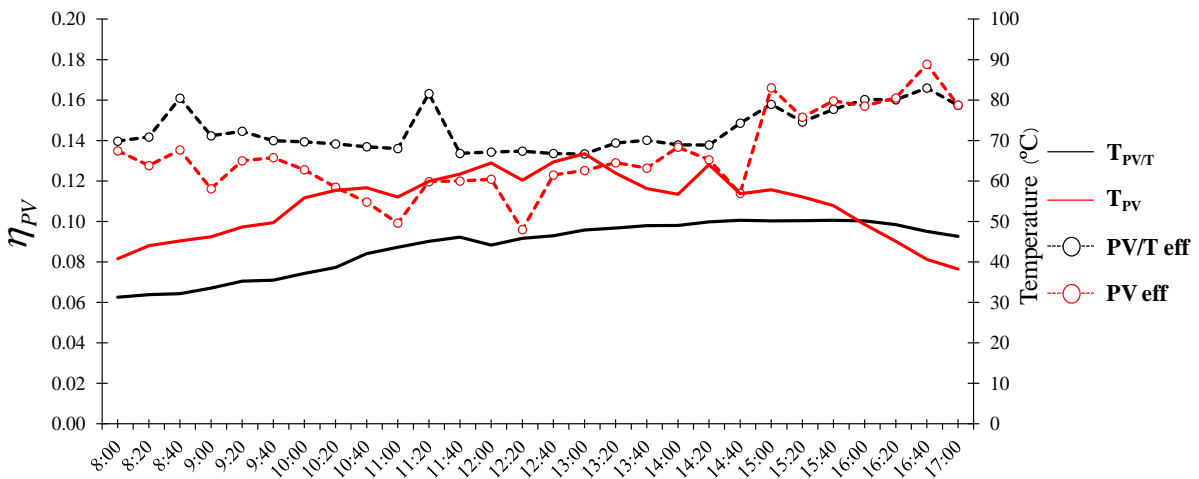


(ค) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

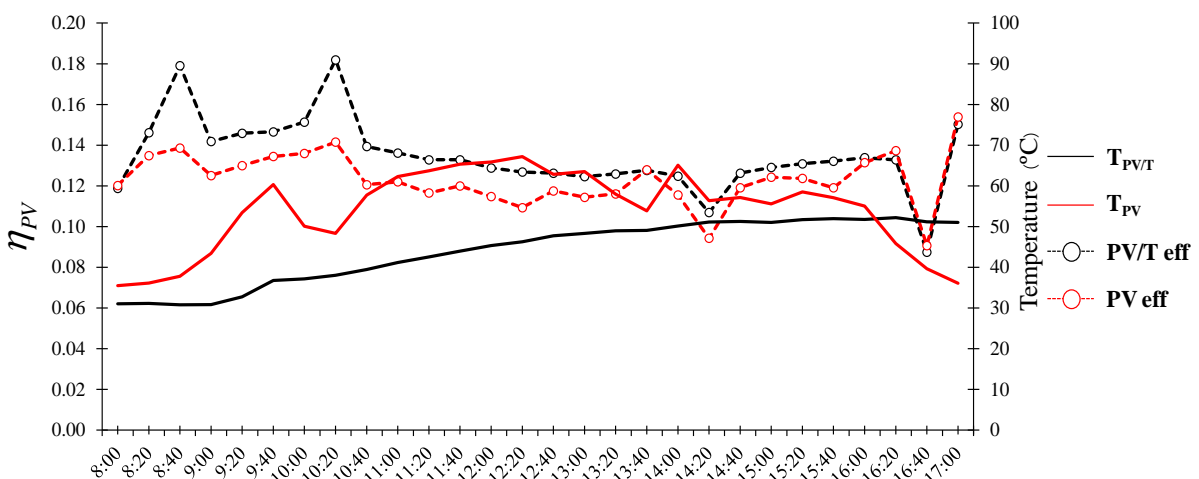
รูปที่ 6 กราฟกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T ( $P_{max_{PV/T}}$ ) และแผง PV ( $P_{max_{PV}}$ ) และความเข้มแสงอาทิตย์ ( $I_T$ )



(ก) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)

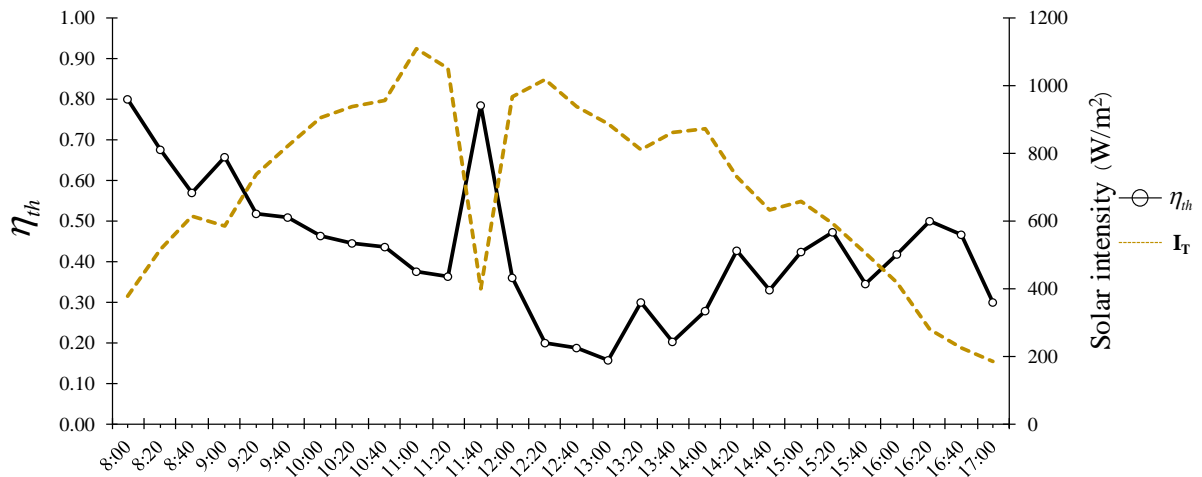


(ข) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

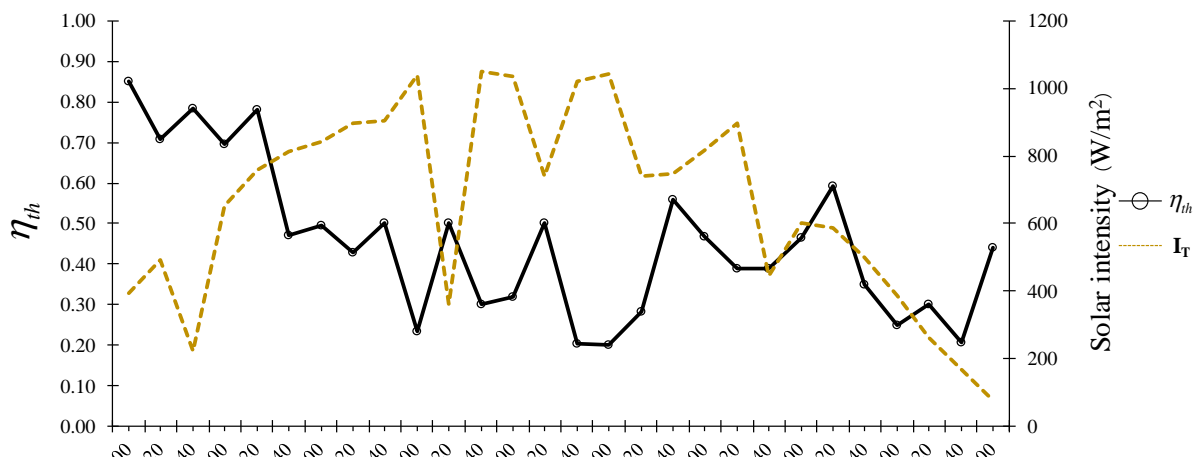


(ค) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

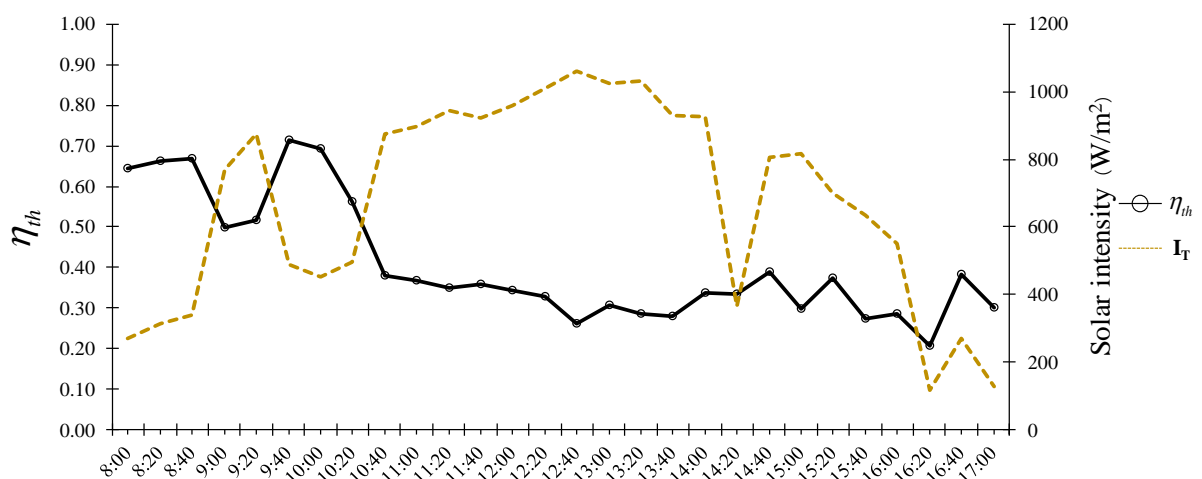
รูปที่ 7 กราฟประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะของแผง PV/T (PV/T eff) และแผง PV (PV eff) กับอุณหภูมิของแผง



(ก) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)



(ข) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)



(ค) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

รูปที่ 8 กราฟประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะของแผง PV/T ( $\eta_{th}$ ) กับความเข้มแสงอาทิตย์



#### 4. สรุปผลการทดสอบ

1. อุณหภูมิของแผง PV/T จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T มีค่าสูงกว่าแผง PV โดยทั่วไปในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 15.00 น. แผง PV/T จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ที่  $8-10^{\circ}\text{C}$  แต่ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงมีค่าต่ำ อาทิ ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของแผง PV จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าแผง PV/T เนื่องจากความสามารถในการคายความร้อนบริเวณด้านหลังแผงที่สูง แต่ไม่มีผลต่อผลต่างของกำลังไฟฟ้านัก เนื่องจากเป็นช่วงที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำ

2. แผง PV/T มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแผง PV ที่ 6.78-13.97% เนื่องจากอุณหภูมิของแผงที่ต่ำกว่า ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Thermal coefficient) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ที่นำมา

3. จากการคำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันพบว่า แผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะเฉลี่ยที่

14.20-15.00% และประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงขณะเฉลี่ยที่ 40.70-44.30% ขณะที่แผง PV มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงขณะเฉลี่ยที่ 12.00-13.40% โดยค่าประสิทธิภาพนี้จะขึ้นกับความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศในวันที่ทำการทดสอบด้วยเช่นกัน

4. หากเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของทั้ง 2 ระบบ พบว่า แผง PV/T มีค่าพลังงานสุทธิสูงกว่าแผง PV กว่า 4 เท่า ในทุกกรณีทำการทดสอบ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบาย และ แผน พ ลั ง ง า น ค ณ ะ วิ ศ ว ก ร ร ม ศ า ส ต ร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T., (1998), The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel, *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 120, pp. 368-375.
- [2] Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein. R.J., (1971), Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness, *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 14, pp. 601-617.
- [3] Gas Turbine Heat transfer and cooling Technology 2<sup>nd</sup> Edition ชื่อผู้เขียน Je-Chin Han, Sandip Dutta Srinath Ekkeed, *Taylor & Francis Group*, USA, pp. 372-375.
- [4] Natthaporn Kaewchoothong, Kittinan Maliwan, Kenichiro Takeishi, Chayut Nuntadusit., (2017), Effect of inclined ribs on heat transfer coefficient in stationary square channel. *Theoretical & Applied Mechanics Letters* 7, pp. 344–350.
- [5] E. Skoplaki and J.A. Palyvos (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy* 34, pp. 23-29.
- [6] Stefan Krauter (2004). Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 82, pp. 131-137.
- [7] อิศระพงศ์ กันธิยะ อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริจรณ์ (2558). การทดสอบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของโมดูลโซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีครีบบระบายความร้อนด้วยอากาศ. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 14, ฮอไรซันวิลเลแอนด์รีสอร์ทและสวนพฤกษศาสตร์ทิวชล จังหวัดเชียงใหม่
- [8] มัชฌิมา รังสิโยภาส มัลลิกา คันทะมุล นิโบล ชาราสมบัติ และ วรันต์พงษ์ วัชรพงศ์วัฒน์ (2559). การประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, โรงแรม บีพี สมิทลา บีช รีสอร์ท จังหวัดสงขลา

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธนากรณ์ สุขคะโต	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6010120075	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

### ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

#### (1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ธนากรณ์ สุขคะโต, ณัฐพร แก้วชูทอง, มั๊กตาร์ แวหะยี, จันทกานต์ ทวีกุล และ ชยุต นันทดุสิต, 2562, “การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีปในช่องการไหลแบบขนาน”, การประชุมวิชาการ เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 18 ระหว่างวันที่ 20-21 มีนาคม 2562 ณ โรงแรม กระเป๋ที่ร้อนท์ เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่

ธนากรณ์ สุขคะโต, มั๊กตาร์ แวหะยี, จันทกานต์ ทวีกุล และ ชยุต นันทดุสิต, 2561, “การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดครีปโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน”, การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 ระหว่างวันที่ 3-6 กรกฎาคม 2561 ณ โรงแรม มุกดาหารแกรนด์ จังหวัดมุกดาหาร

#### (2) บทความวิชาการ (Journal paper)

ธนากรณ์ สุขคะโต, มั๊กตาร์ แวหะยี, จันทกานต์ ทวีกุล, อิบรอเอ็ง ปิยา, นิโอะ ปุชู, ปริญญา พานิชย์ และ ชยุต นันทดุสิต, 2561, “การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยใช้เทคนิคเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน”, วารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเชียงใหม่ (อยู่ในขั้นตอนตรวจสอบบทความ)