

พฤติกรรมความร้อนในช่องขนานเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มี ครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับ

Thermal Behaviors in Solar Air Heater Channel with V-shaped Trapezoidal-ribs on Absorber Plate

พิทักษ์ พร้อมไธสง

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

Email: pitak@mutacth.com

และ พงษ์เจต พรหมวงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Email: kppongje@kmitl.ac.th

Manuscript received April 2, 2018

Revised June 12, 2018

บทคัดย่อ

ครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนาน เป็นครีบลีที่ได้รับการออกแบบใหม่ด้วยการนำข้อดีของผิวครีบลีเอียงทำมุมกับการไหลเพื่อลดตัวประกอบเสียดทานรวมกับการสร้างการไหลหมุนวนคู่ที่เกิดขึ้นเฉพาะในครีบลีจั่ววางรูปตัววีเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ โดยมีการไหลในช่วงปั่นป่วนที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 3000-20,000 อัตราส่วนความสูงครีบลี, $H_R=0.04, 0.06, 0.08$ และ 0.10 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบลี, $P_R=0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 และอัตราส่วนความกว้างของฐานครีบลี, $W_R=0.10, 0.15$ และ 0.20 คือตัวแปรที่จะศึกษา ที่มุมปะทะการไหลของครีบลีวางรูปตัววี (α) และค่าอัตราส่วนความกว้างของปลายครีบลี (t/H) คงที่คือ 30° และ 0.05 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับ ให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่การพัฒนาเต็มพื้นที่ตำแหน่ง $x/H=10$ และพบว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนคู่แบบสวนทางกันเข้าสู่พื้นผิว ทำให้กระแสการไหลเกิดการกระแทกเข้ากับผนังของแผ่นดูดซับและบริเวณชั้นของไหลที่มีอุณหภูมิสูง อีกทั้งยังทำให้ของไหลเกิดการผสมกันได้ดีขึ้น ซึ่งพฤติกรรมนี้ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า H_R และการลดลงของค่า P_R และ W_R ส่งผลให้ประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น ในขณะที่

การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับทั้งค่า H_R, P_R และ W_R ในช่วงที่ทำการศึกษาค้นพบว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง $1.16-4.57, 1.78-10.44$ และ $0.84-2.53$ เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบตามลำดับ โดยกรณี $H_R=0.08, P_R=0.6$ และ $W_R=0.20$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนและค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่สูงที่สุดที่ 2.53 และ 4.57 ตามลำดับ ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 3000

คำสำคัญ: การไหลแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อน เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนาน ครีบลีเหลี่ยมคางหมู

ABSTRACT

A V-shaped trapezoidal-rib placed on the absorber plate of a channel solar air heater is a newly design with the benefit combination between the inclined-surface of rib sides to reduce the friction factor and V-shaped ribs to create counter-rotating vortices for increasing the heat transfer rate is presented using the 3D numerical method. The rib height ratio, $H_R=0.04, 0.06, 0.08$ and 0.10 , pitch ratio, $P_R=0.4, 0.6, 0.8$ and 1.0 , base-rib wide ratio, $W_R=0.10, 0.15$ and 0.20 at a constant attack angle, $\alpha=30^\circ$ and rib-tip wide ratio, $t/H=0.05$ are parameters of interest in investigating in the turbulent region with Reynolds number, $Re=3000-$

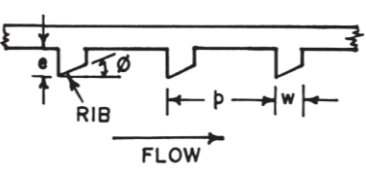
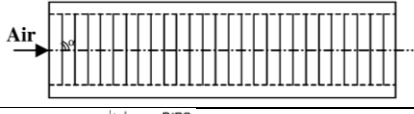
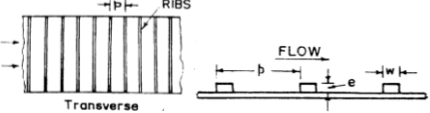
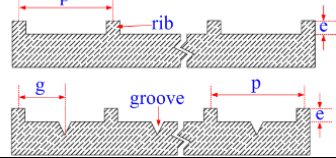
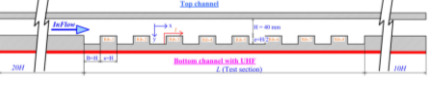
20,000. The numerical results revealed that the V-shaped trapezoidal-rib absorber gives the fully developed periodic flow and heat transfer at $x/H=10$. The V-shaped trapezoidal-rib absorber generates the counter-rotating-vortices in the form of common-flow-down vortices leading to the induction of impinging flow on the absorber surface apart from disrupting the thermal boundary layer and increasing the fast fluid mixing. These phenomena result in the greater increase of the heat transfer rate. The rise of H_R and the decrease of P_R and W_R provide the increment of friction factor while the increase of the heat transfer depends on H_R , P_R and W_R values. In the range investigated, the Nu/Nu_0 , f/f_0 and TEF are in the range of 1.16-4.57, 1.78-10.44 and 0.84-2.53, respectively. At $H_R=0.08$, $P_R=0.6$ and $W_R=0.20$ the highest TEF and Nu/Nu_0 are found to be around 2.53 and 4.57 at $Re=3000$, respectively.

Keyword: turbulent flow, heat transfer, solar air heater channel, trapezoidal-rib

1. บทนำ

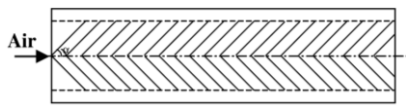
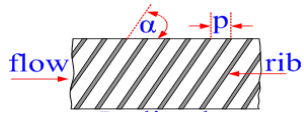
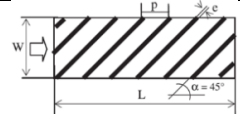
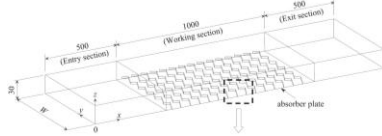
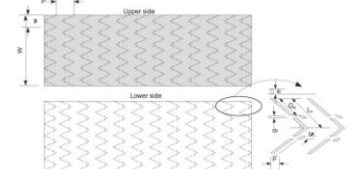
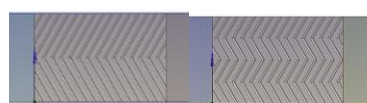
ครีบลักษณะต่าง ๆ บนแผ่นดูดซับในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนาน (solar air heater channel) ถูกใช้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับ หลักการพื้นฐานของครีบบนแผ่นดูดซับคือการรบกวนการก่อตัวของชั้นความร้อน (thermal boundary layer) ที่บริเวณชิดผนังตลอดความยาวท่อ และพาความร้อนออกจากผนังท่อภายในบริเวณกลางท่อ อันเป็นผลเนื่องมาจากการแยกตัวของของไหล การหมุนวน และการกระแทกเข้ากับผนังท่อ ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่นำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของครีบลและการจัดวางส่งผลให้สนามการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นำไปสู่ความแตกต่างของการกระจายค่าการพาความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนความสูงและอัตราส่วนระยะพิทช์คือตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมไปถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวม

ตารางที่ 1 ครีบบางขวางการไหลบนแผ่นดูดซับ

นักวิจัย	รูปร่างครีบล	ตัวแปร	ผลลัพธ์
Karwa และคณะ [1]		$Re=3750-16,350$ $AR=6.88, 6.98, 9.38$ $p/e=4.58, 7.09$ $e/D_h=0.0197, 0.0256, 0.0441$ $\phi = 15^\circ$	$Nu/Nu_0=1.45-2.2$, $f/f_0=1.8-3.9$, $\eta = 35-70\%$
Ebrahim Momin และคณะ [2]		$Re=2500-18,000$, $AR=10.15$, $e/D_h=0.02$, $p/e=10$	$Nu=12-67$, $f=0.0367-0.067$, $TEF=1.16-1.62$
Karwa [3]		$Re=2800-15,000$, $AR=7.19-7.75$, $p/e=10$, $e/D_h=0.0467-0.05$	$St/St_0=1.65-1.9$, $f/f_0=2.68-2.94$, $TEF=1.2-1.4$
Jaurker และคณะ [4]		$Re=3000-20,000$, $AR=7.09$ $e/D=0.0181-0.0363$, $p/e=4.5-10.0$, $g/p=0.3-0.7$	$Nu=15-160$, $f=0.06-0.145$, $TEF=0.95-1.82$
Eiamsa-ard และ Promvong [5]		$Re=6000-18,000$, $B/H=0.5-1.75$, $p/H=2.0$, $e/H=0.5$	$Nu=26.26-63.3$, $f=0.049-0.162$, $TEF=0.95-1.33$

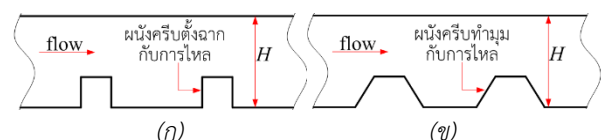
ซี่ผิวเรียบ

ตารางที่ 2 ครีบบางทำมุมการไหลบนแผ่นดูดซับ

นักวิจัย	รูปร่างครีบ	ตัวแปร	ผลลัพธ์
EWRahim Momin และคณะ [2]		$Re=2500-18,000$, $AR=10.15$, $e/D_h=0.02-0.034$, $p/e=10$, $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	$Nu=11.2-73.1$, $f=0.028-0.096$, $TEF=1.08-1.42$
Karwa [3]		$Re=2800-15,000$, $AR=7.19-7.75$, $p/e=10$, $e/D_h=0.0467-0.05$, $\alpha=60^\circ$	$St/St_s=1.87-2.12$, $f/f_0=3.02-3.42$, $TEF=1.45-1.49$
Karwa [3]		$Re=2800-15,000$, $AR=7.19-7.75$, $p/e=10$, $e/D_h=0.0467-0.05$, $\alpha=60^\circ$	$St/St_s=1.65-2.47$, $f/f_0=2.46-3.92$, $TEF=1.2-1.8$
Tanda [7]		$Re=4000-20,000$, $AR=5$, $p/e=6.66-20$, $e/D_h=0.09$, $e/H=0.15$, $\alpha=45^\circ$	$Nu=60.7-159.3$, $f=0.068-0.12$, $TEF=0.87-1.28$
Jin และคณะ [8]		$Re=8000-20,000$, $AR=10$, $W/w=1-10$, $e/D_h=0.025-0.11$, $p/e=3-20$, $\alpha=30^\circ, 75^\circ$	$Nu=55.1-209.4$, $f=0.113-0.578$, $TEF=1.06-1.93$
Ravi และ Saini [9]		$Re=2000-20,000$, $r/e=1-2.5$, $P'/P=0.2$, $P/e=10$, $e/D=0.043$, $g/e=1.0$, $G_d/L_v=0.7$, $\alpha=60^\circ$	$Nu=15-448$, $f=0.022-0.196$
Thakur และคณะ [10]		$Re=5000-15,000$, $AR=5$, $e/D_h=0.03$, $P/e=10$, $\alpha=30^\circ-90^\circ$	$Nu=40-130$, $f=0.052-0.19$, $TEF=1.9-2.3$

จากรูปร่างของครีบในงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นพบว่าผนังของครีบบางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ตั้งฉากกับการไหล และทำมุมกับการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1 ข้อดีของผนังที่ตั้งฉากกับการไหลคือให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงในขณะที่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็มีค่าสูงเช่นกัน ส่วนกรณีผนังที่ทำมุมกับการไหลจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าเนื่องจากระดับความรุนแรงในการปั่นป่วนของอากาศลดลง ส่งผลให้ชั้นความร้อนอุทกกรบวนได้น้อยลง ในขณะที่ความดันตกคร่อมก็ลดลงเช่นกันอันเนื่องมาจากอากาศสามารถไหลได้สะดวกยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมจะอยู่ในรูปของเทอม $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$ ซึ่งหากครีบที่มีผนังทำมุมกับการไหลมีรูปร่างและลักษณะการจัดวางที่เหมาะสม อาจทำให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่ากรณีครีบที่มีผนังตั้งฉากกับการไหล ในขณะที่ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานไม่สูง

เกินไป เมื่อพิจารณาครีบที่มีการจัดวางทำมุมกับการไหลแล้วดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าครีบบางรูปตัววีให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าครีบบางเอียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งครีบบางตัวรูปวีหลายตัว (multi V-ribs) [9, 10] ซึ่งก่อให้เกิดการไหลหมุนวนคู่เป็นจำนวนหลายคู่ตลอดความยาวท่อ ทำให้ชั้นความร้อนอุทกกรบวนได้มากขึ้น รวมถึงอากาศสามารถผสมผสานกันได้ดีขึ้น นำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 1 ผนังครีบบนแผ่นดูดซับแบบ (ก) ตั้งฉากกับการไหล และ (ข) ทำมุมกับการไหล

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำข้อดีของผนังครีบทึบที่ห้ามุมกับการไหลในแง่ของการให้ตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำ มารวมกับข้อดีของครีบบางรูปตัววีหลายตัวในแง่ของการให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เรียกว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูารูปตัววี โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีมุมปะทะการไหลของครีบบางรูปตัววี, $\alpha=30^\circ$ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูง และศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงครีบ, $H_R=0.04, 0.06, 0.08$ และ 0.10 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบ, $P_R=0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 และอัตราส่วนความกว้างของฐานครีบ, $W_R=0.10, 0.15$ และ 0.20 โดยมีค่าอัตราส่วนความกว้างของปลายครีบ (t/H) คงที่คือ 0.05 ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง $Re=3000-20,000$ ลักษณะกระแสน้ำไหลของของไหลจะถูกแสดงให้เห็นในรูปของเส้นกระแสการไหล 3 มิติ และ 2 มิติ ความรุนแรงของกระแสน้ำไหลจะนำเสนอในรูปของการกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนในระนาบขวางการไหล ส่วนการถ่ายเทความร้อนจะนำเสนอในรูปของการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลและการกระจายของเลขนัสเซิลท์

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.1 รูปร่างของครีบทึบที่ทำการศึกษา

ท่อการไหลสำหรับอากาศในเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์คือท่อช่องขนานที่มีแผ่นดูดซับเป็นผนังด้านล่าง และเพื่อเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับ แผ่นดูดซับจะถูกออกแบบให้มีครีบลีเหลี่ยมคางหมูารูปตัววี โดยกำหนดให้ท่อช่องขนานมีความกว้าง, $W=0.2$ m และสูง, $H=0.02$ m ($W/H, AR=10$) ดังแสดงในรูปที่ 2 กำหนดให้ครีบลีเหลี่ยมคางหมูารูปตัววีมีมุมปะทะการไหล, $\alpha=30^\circ$ และศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างครีบต่อความสูงท่อ, p/H , $P_R=0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 มีความสูงครีบต่อความสูงท่อ, e/H , $H_R=0.04, 0.06, 0.08$ และ 0.10 มีความกว้างของฐานครีบต่อความสูงท่อ, b/W , $W_R=0.10, 0.15$ และ 0.20 รวมทั้งสิ้น 48 กรณีศึกษา โดยกำหนดให้ความกว้างของปลายครีบต่อความสูงท่อ (t/H) คงที่เท่ากับ 0.05 และเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง $Re=3000-20,000$

เพื่อตรวจสอบการเข้าสู่การพัฒนาเต็มที่ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางกายภาพแบบท่อยาว โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงทางเข้า, ช่วงให้ความร้อน และช่วงทางออก ซึ่งช่วงให้ความร้อนกำหนดให้มีความยาว $20H$ ส่วนช่วงทางเข้าและช่วงทางออกถูกต่อขยายให้มีความยาวเท่ากับ $10H$ และ $5H$ เพื่อให้อากาศไหลเข้าแบบยูนิฟอร์มและป้องกันการไหลย้อนกลับตามลำดับ

2.2 ลักษณะของอิลิเมนต์

โดเมนที่ใช้ในการคำนวณจะใช้อิลิเมนต์สี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ โดยที่บริเวณผนังจะกำหนดให้อิลิเมนต์มีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากอิทธิพลของความหนืด ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิมากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นเพื่อความแม่นยำในการหาคำตอบจึงกำหนดให้ความหนาแน่นของอิลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังมีค่า $y^+ \leq 1$ สำหรับทุกโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ

2.3 เงื่อนไขขอบและสมมติฐานสำหรับโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ

เงื่อนไขที่ขอบสำหรับกรณีท่อยาวจะกำหนดให้อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ และทางออกกำหนดให้เป็นความดันบรรยากาศ ส่วนกรณีแบบจำลอง periodic module จะกำหนดให้ทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic โดยแบบจำลองทั้งแบบท่อยาวและแบบ periodic จะกำหนดให้ขอบเขตด้านข้างเป็นแบบสมมาตร แผ่นดูดซับกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 600 W/m^2 และทุกพื้นผิวกำหนดให้ไม่มีการสั่นไถล ภายใต้สมมติฐานคือไม่คิดผลของการแผ่รังสีความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด ไม่พิจารณาแรงวัตถุ กำหนดให้คุณสมบัติของอากาศคงที่ เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้ การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัวและ 3 มิติ

2.4 สมการที่เกี่ยวข้องและตัวแปรที่ให้ความสนใจ

จากสมมติฐานข้างต้น สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนสามารถแสดงในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้ สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

เมื่อ $-\overline{\rho u_i u_j}$ ความเค้นเรย์โนลด์ กำหนดเป็น

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho u_0 D_h}{\mu}$$

ตัวประกอบเสียดทานสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) D_h / \frac{1}{2} \rho u_0^2$$

เลขนัสเซิลสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k_a}$$

เลขนัสเซิลเฉลี่ยแสดงดังนี้

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA$$

สมรรถนะเชิงความร้อนกำหนดโดยอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อช่องขนานที่มีครีบสี่เหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับ, h ต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อช่องขนานที่มีแผ่นดูดซับผิวเรียบ, h_0

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (13)$$

เมื่อ f_0 และ Nu_0 คือตัวประกอบเสียดทานและเลขนัสเซิลของท่อช่องขนานที่มีแผ่นดูดซับผิวเรียบตามลำดับ

3. ผลการจำลอง

3.1 การตรวจสอบความถูกต้อง

รูปที่ 3 แสดงถึงการตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับท่อช่องขนานที่มีแผ่นดูดซับผิวเรียบในเทอมของเลขนัสเซิลและตัวประกอบเสียดทานโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบจำลอง คือ RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$ เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ [12] และผลที่ได้จากการทดลองของ Promvong และ Thianpong [13] สำหรับเลขนัสเซิล สหสัมพันธ์ของ Gnielinski กำหนดเป็น

$$Nu_0 = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \left\{ \begin{array}{l} 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \\ 0.5 \leq Pr \leq 2000 \end{array} \right\} \quad (14)$$

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter กำหนดเป็น

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{สำหรับการทำให้ร้อน} \quad (15)$$

สำหรับตัวประกอบเสียดทาน สหสัมพันธ์ของ Petukhov กำหนดเป็น

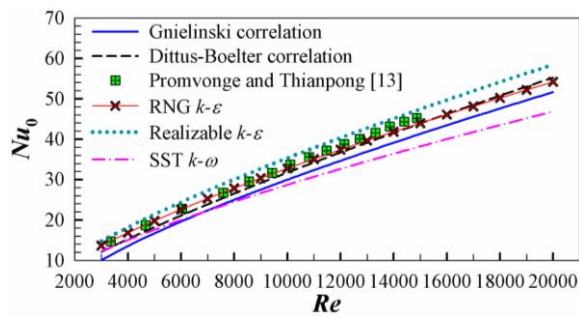
$$f_0 = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2}, \quad \{3000 < Re < 5 \times 10^6\} \quad (16)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius กำหนดเป็น

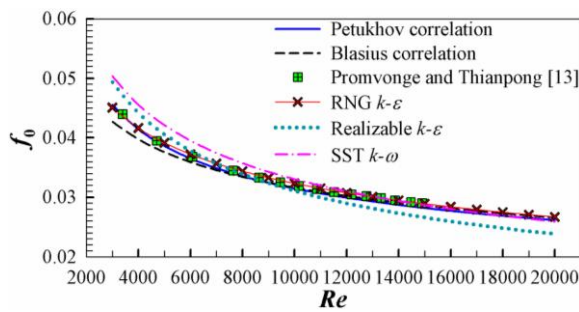
$$f_0 = 0.316 Re^{-0.25} \quad (17)$$

จากรูปพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ให้ค่าเลขนัสเซิลและค่าตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์ [12] และผลที่ได้จากการทดลองของ Promvong และ Thianpong [13] มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนอื่น ๆ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเลขนัสเซิลและตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีค่าอยู่ในช่วง 4.9-10.7% และ 1.7-4.6% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในเชิงวิศวกรรม และแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของการจำลองเชิงตัวเลข

เนื่องจากการไหลผ่านครีบส่งผลให้กระแสการไหลเกิดการแยกตัว ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความแม่นยำสำหรับการคำนวณการไหล ที่ก่อให้เกิดการแยกตัวของกระแสการไหลสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จึงได้นำผลการจำลองเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองโดยเลือกกรณีท่อช่องขนานที่มีครีบและร่องรูปสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับในงานวิจัยของ Eiamsa-ard และ Promvong [6] ดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ให้แนวโน้มของเลขนัสเซิลและตัวประกอบเสียดทานไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 4.8\%$ และ $\pm 5.5\%$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในเชิงวิศวกรรม ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือในกรณีที่กระแสการไหลเกิดการแยกตัวเมื่อไหลผ่านครีบ และแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จะถูกนำไปใช้กับโดเมนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับทุก ๆ กรณี

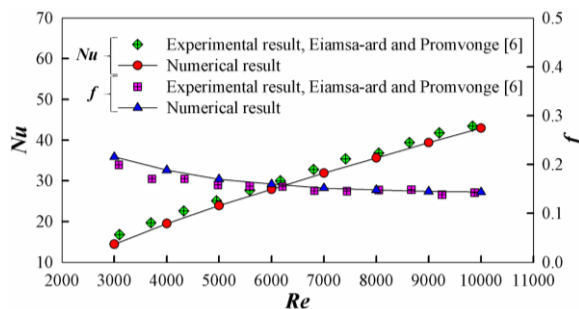


(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของท่อช่องขนานที่มีแผ่นดูดซับผิวเรียบสำหรับ (ก) เลขนัสเซิลท์ และ (ข) ตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของท่อช่องขนานที่มีครีบลำและร่องรูปสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับ

3.2 การตรวจสอบการเข้าสู่การพัฒนาแบบเต็มที่

การตรวจสอบเข้าสู่การพัฒนาแบบเต็มที่ของการไหลในรูปของโปรไฟล์ความเร็วและการถ่ายเทความร้อนในรูปของโปรไฟล์เลขนัสเซิลท์ในท่อช่องขนานที่มีครีบลำเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับแสดงไว้ในรูปที่ 5-7 โดยนำเสนอสำหรับกรณี $W_R=0.15$, $H_R=0.10$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$ ดังนี้

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงโปรไฟล์ความเร็วตามแกนการไหลที่ตำแหน่งกลางท่อ จากรูปพบว่าโปรไฟล์ความเร็วของอากาศในช่วงของครีบลำเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับแบ่งออกเป็น 2

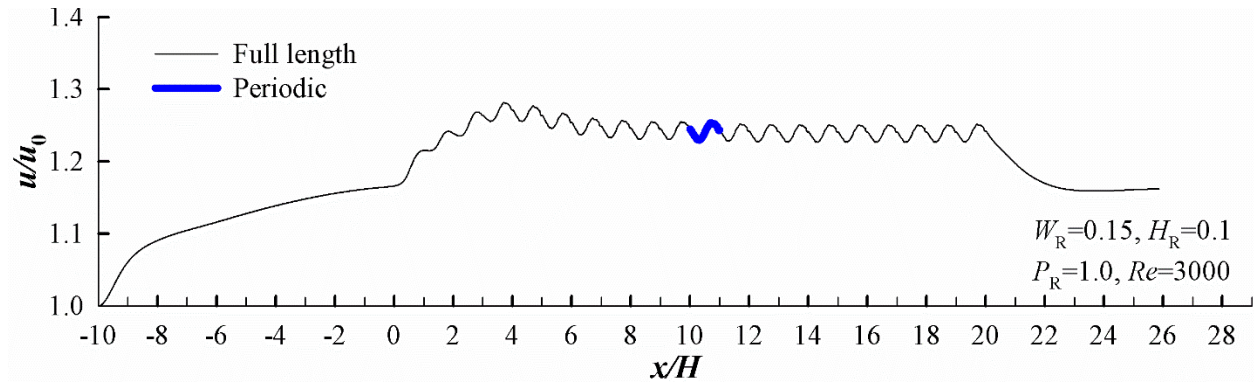
ช่วง คือ ช่วงการไหลกำลังพัฒนา และช่วงการไหลพัฒนาเต็มที่ โดยที่ระยะ $x/H=0-10$ เป็นช่วงการไหลที่กำลังพัฒนา ซึ่งอากาศจะเร่งความเร็วขึ้นเพื่อไหลผ่านครีบลำ หลังจากนั้นความเร็วของอากาศจะค่อยๆ ปรับตัวลดลง ในช่วงระยะนี้โปรไฟล์ความเร็วของอากาศจะมีค่าความเร็วไม่เท่ากันถึงแม้ว่าจะมีรูปร่างที่คล้ายกันก็ตาม ต่อมาอากาศจะปรับตัวเข้าสู่การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ ซึ่งจะปรากฏการซ้ำกันเป็นช่วงทั้งรูปร่างของโปรไฟล์ความเร็วและค่าความเร็ว โดยจะเริ่มปรากฏที่ระยะ $x/H=10$ เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าครีบลำเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับ ก่อให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนคู่แบบสวนทาง โดยมีลักษณะการหมุนเป็นแบบ common flow down ส่งผลให้กระแสการไหลกระแทกเข้ากับผนังของแผ่นดูดซับ ทำให้ชั้นขีตติรกรบกวน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการผสมผสานกันของอากาศและพาอากาศที่มีอุณหภูมิสูงที่บริเวณผนังด้านล่างไปยังบริเวณผนังด้านบนเพื่อแลกเปลี่ยนกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ พฤติกรรมนี้ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ผนังแผ่นดูดซับเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่ยาวจะปรากฏโครงสร้างการไหลของอากาศที่แตกต่างกันในช่วงกำลังพัฒนาเนื่องจากการไหลที่กำลังปรับตัว แต่สำหรับช่วงการไหลที่พัฒนาเต็มที่แล้วจะปรากฏโครงสร้างการไหลเหมือนกันสำหรับทุกๆ โมดูล และในกรณีท่อแบบ periodic module จะปรากฏโครงสร้างการไหลที่เหมือนกันกับโครงสร้างการไหลในช่วงการไหลที่พัฒนาเต็มที่ในท่อยาว (เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกัน) ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าการกำหนดให้เงื่อนไขให้ทางเข้าและทางออกเป็น periodic ในท่อแบบ periodic module สามารถให้คำตอบเดียวกันกับแบบจำลองท่อยาวในช่วงการไหลที่พัฒนาเต็มที่ และเมื่อสมมติว่าท่อยาวมาก จึงส่งผลให้อิทธิพลของช่วงทางเข้าแทบจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคำตอบ

การเข้าสู่การพัฒนาแบบเต็มที่ของการถ่ายเทความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 7 พบว่าโปรไฟล์ของเลขนัสเซิลท์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงกำลังพัฒนา และช่วงพัฒนาเต็มที่ เช่นเดียวกับโปรไฟล์ของความเร็ว โดยช่วงกำลังพัฒนาปรากฏในช่วง $x/H=0-10$ ซึ่งเลขนัสเซิลท์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิของแผ่นดูดซับยังมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง หลังจากนั้นเลขนัสเซิลท์จะค่อยๆ ลดลง จนเข้าสู่การพัฒนาเต็มที่ที่ตำแหน่ง $x/H=10$ เป็นต้นไป โดยจะปรากฏการซ้ำกันเป็นช่วงสำหรับทั้งรูปร่างของโปรไฟล์และค่าเลขนัสเซิลท์ เมื่อพิจารณาการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังของแผ่นดูดซับพบว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง (ค่าเลขนัสเซิลท์สูง) จะปรากฏที่บริเวณพื้นที่ส่วนต้นของตัวครีบลำเนื่องจากเกิดการกระแทกของอากาศโดยตรง และที่บริเวณพื้นที่ราบเรียบระหว่างครีบลำเนื่องจากอิทธิพลของกระแสการไหลแบบหมุนวนคู่แบบสวนทางนั่นเอง เมื่อพิจารณา

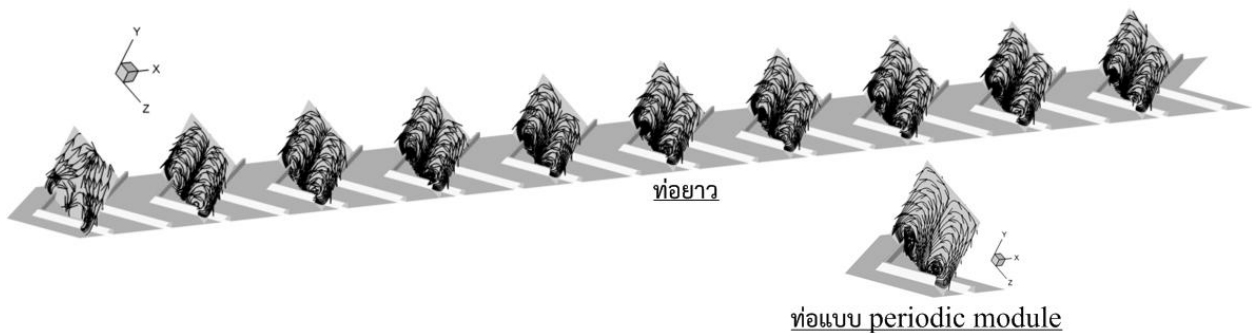
ลักษณะการกระจายเลขนัสเซิลท์ในท่อแบบ periodic module พบว่ามีลักษณะการกระจายเลขนัสเซิลท์เหมือนกับช่วงพัฒนาเต็มที่อยู่ในท่อยาว

ข้อดีของการใช้แบบจำลองแบบ periodic module คือ

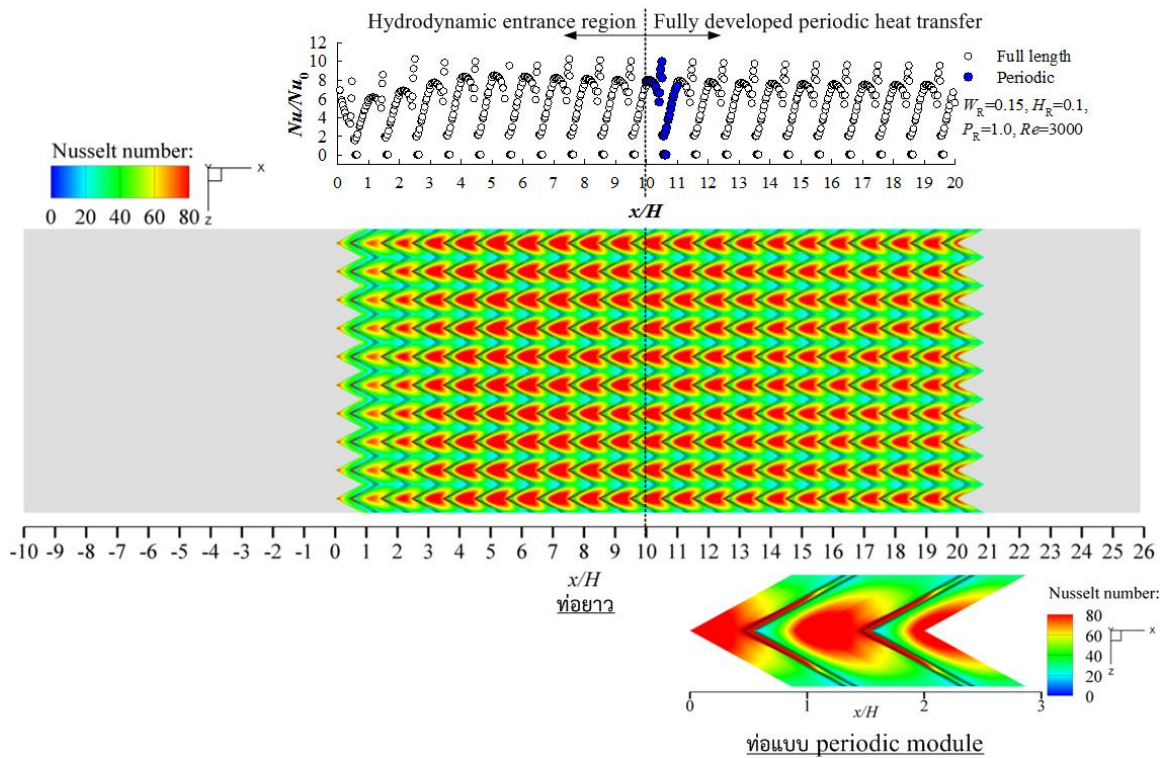
จำนวนอีลิเมนต์ที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับแบบจำลองท่อยาว ในขณะที่ให้คำตอบเดียวกันในช่วงการไหลที่พัฒนาเต็มที่ ส่งผลให้เวลาในการเข้าสู่ของคำตอบลดลง และลดพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลในหน่วยความจำของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์



รูปที่ 5 โปรไฟล์ความเร็วตามแกนการไหลที่ตำแหน่งกลางท่อสำหรับ $W_R=0.15$, $H_R=0.10$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$



รูปที่ 6 เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ $W_R=0.15$, $H_R=0.10$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$



รูปที่ 7 โปรไฟล์เลขนัสเซลล์และการกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนังสำหรับ $W_R=0.15$, $H_R=0.10$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$

3.3 กระแสการไหล การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนและการกระจายอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหล และการกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนัง

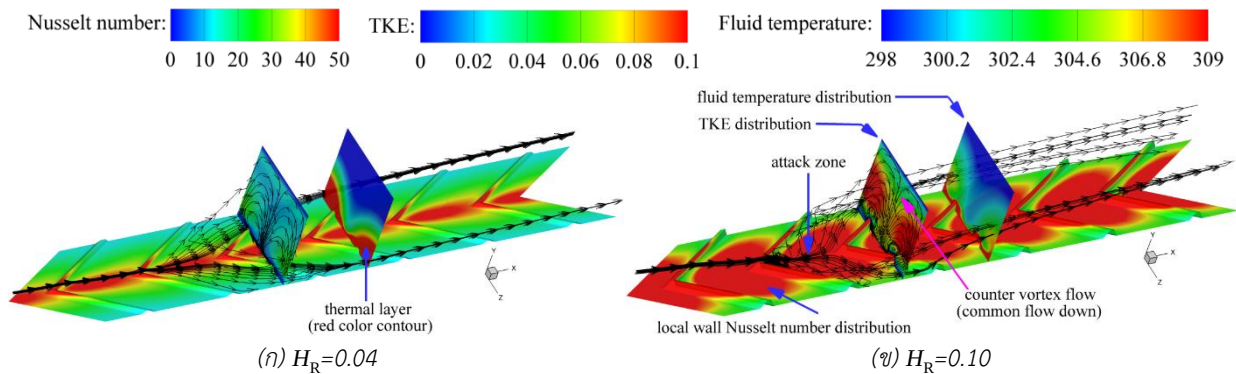
อิทธิพลของค่า H_R , P_R และ W_R ต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 8-10 โดยนำเสนอในรูปแบบของการกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนัง การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วน และอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหล เส้นกระแสการไหล 3 มิติ และเส้นกระแสการไหล 2 มิติ ในระนาบขวางการไหลที่ค่า $Re=3000$ โดยทั่วไปครีปส์เหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีเหนี่ยวนำให้อากาศลงมากระแทกที่ผนังบริเวณด้านหลังของครีปส์ และเกิดกระแสการไหลหมุนวนคู่แบบสวนทางกัน ในลักษณะของ common flow down ในระนาบขวางการไหล โดยบริเวณที่ถูกกระแทก (attack zone) จะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงเนื่องจากชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ผนัง (thermal layer) ถูกบริเวณ (ชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ผนังของแผ่นดูดซับจะขวางกั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและแผ่นดูดซับ) อีกทั้งยังทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผนังด้านบนจะถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสการไหลหมุนวนให้เคลื่อนที่มาอยู่บริเวณใกล้กับแผ่นดูดซับ หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากระแสการไหลหมุนวน

สามารถเหนี่ยวนำให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงที่บริเวณใกล้กับผนังของแผ่นดูดซับให้เคลื่อนที่ขึ้นไปแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำที่อยู่บริเวณผนังด้านบน ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่าการเพิ่มการผสมกันของอากาศโดยถ้าหากระดับความรุนแรงของกระแสการไหลเพิ่มขึ้น จะทำให้การผสมกันของอากาศดีขึ้น และส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ผนังของแผ่นดูดซับเพิ่มขึ้น

รูปที่ 8 แสดงถึงอิทธิพลของค่า H_R ที่ค่า $W_R=0.15$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$ เดียวกัน โดยการเปรียบเทียบกรณี $H_R=0.04$ และ 0.10 จากรูปพบว่าเมื่ออากาศไหลมากระแทกที่ผนังจะทำให้กระแสการไหลแยกออกเป็น 2 ทางเนื่องจากอิทธิพลของครีปส์วางรูปตัววี โดยกรณี $H_R=0.04$ แทบจะไม่ปรากฏความปั่นป่วนของเส้นกระแสการไหลเนื่องจากความสูงของครีปส์ต่ำ แต่กรณี $H_R=0.10$ ปรากฏความปั่นป่วนของเส้นกระแสการไหลที่เด่นชัดมากขึ้น (สังเกตจากการหมุนวนของเส้นกระแสการไหล) และระดับความรุนแรงของกระแสการไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าการกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนในระนาบขวางการไหลที่สูงขึ้น ทำให้อากาศผสมกันได้ดียิ่งขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ซึ่งกรณี $H_R=0.04$ จะมีความหนาของชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่ากรณี $H_R=0.10$ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับต่ำ โดยสามารถ

สังเกตได้จากการกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนังซึ่งจะมีพื้นที่สีแดงน้อยกว่ากรณี $H_R=0.10$ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณที่กระแสการไหลมีการไหลข้ามโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณพื้นผิวราบเรียบด้านหลังของ

ปลายครีบ ซึ่งบริเวณนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนต่ำ เนื่องจากชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงถูกรบกวนได้น้อยกว่าบริเวณที่อากาศเกิดการกระแทกนั่นเอง

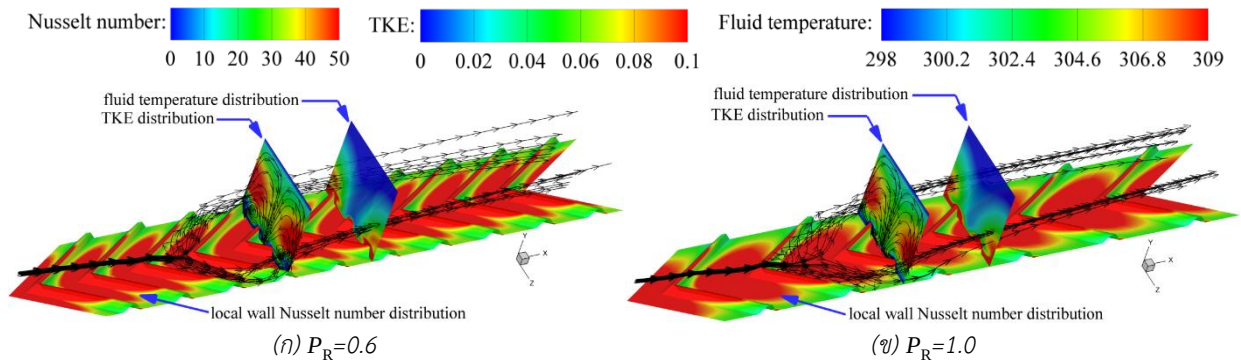


รูปที่ 8 การกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนัง การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนและอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหล เส้นกระแสการไหล 3 มิติ และเส้นกระแสการไหล 2 มิติในระนาบขวางการไหลสำหรับ $W_R=0.15$, $P_R=1.0$ และ $Re=3000$

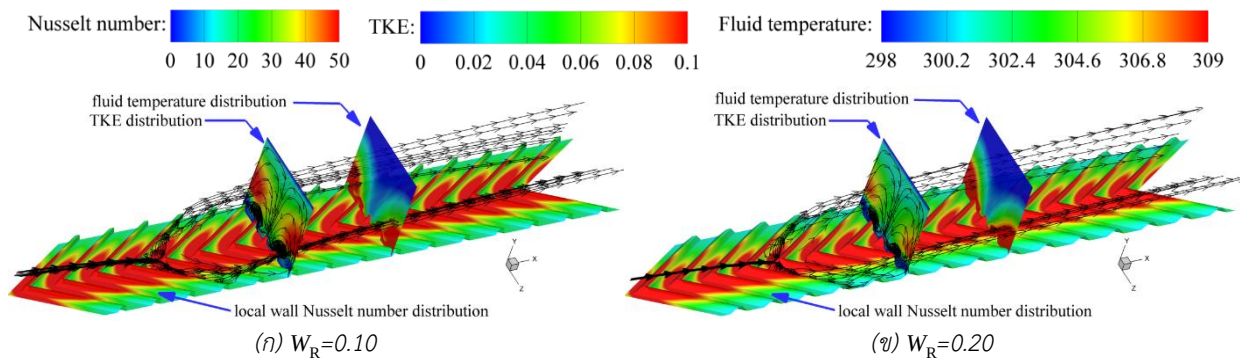
รูปที่ 9 แสดงถึงอิทธิพลของค่า P_R ที่ค่า $W_R=0.15$, $H_R=0.10$ และ $Re=3000$ เดียวกัน โดยการเปรียบเทียบกรณี $P_R=0.6$ และ 1.0 จากรูปพบว่าเส้นกระแสการไหล 3 มิติ สำหรับทั้ง 2 กรณี ปรากฏในลักษณะที่คล้ายกัน แต่กรณี $P_R=0.6$ เส้นกระแสการไหล จะกระแทกเข้าที่ส่วนต้นของครีบอย่างชัดเจน และให้ระดับความรุนแรงของกระแสการไหลที่สูงกว่า ในขณะที่กรณี $P_R=1.0$ เส้นกระแสการไหลจะถูกเหนี่ยวนำให้ตกกระแทกที่บริเวณด้านหลังของ ครีบแล้วจึงแยกตัวออกเป็น 2 ทาง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า P_R ส่งผลให้ ความรุนแรงของกระแสการไหลลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณา การกระจายอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหลพบว่าที่กรณี $P_R=0.6$ ปรากฏความหนาของชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ ผนังแผ่นดูดซับน้อยกว่ากรณี $P_R=1.0$ เนื่องจากการกระแทกที่ รุนแรงของกระแสการไหลที่สูงกว่านั่นเอง เป็นสาเหตุให้อากาศผสม กันได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้กรณี $P_R=0.6$ ให้การถ่ายเทความร้อนที่ผนังได้ สูงกว่ากรณี $P_R=1.0$ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูง (พื้นที่สีแดง) ที่ปรากฏมากกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามกรณี

ที่ค่า P_R ต่ำ ๆ จะให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้น ของค่าตัวประกอบเสียดทาน ทำให้สูญเสียกำลังขับเคลื่อนของพัดลมสูงกว่ากรณีที่มีค่า P_R สูงๆ

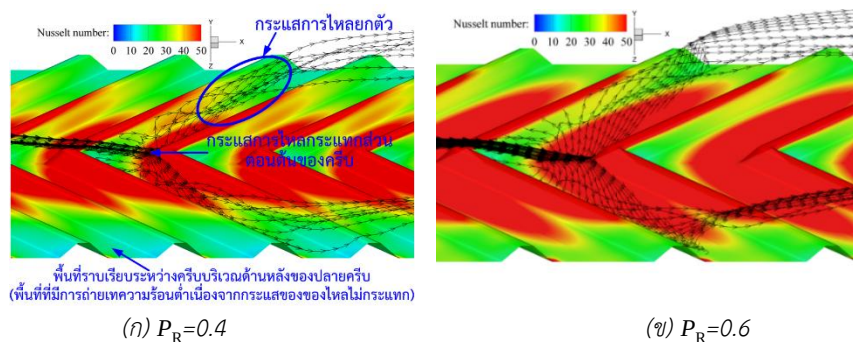
รูปที่ 10 แสดงถึงอิทธิพลของค่า W_R ที่ค่า $P_R=0.4$, $H_R=0.08$ และ $Re=3000$ เดียวกัน โดยการเปรียบเทียบกรณี $W_R=0.10$ และ 0.20 จากรูปพบว่าเส้นกระแสการไหลจะปรากฏในลักษณะที่ คล้ายกัน แต่อย่างไรก็ตามกรณี $W_R=0.10$ จะให้ผนังครีบที่มีความ ลาดเอียงกับแกนการไหลสูงกว่ากรณี $W_R=0.20$ ซึ่งส่งผลกระทบบ โดยตรงต่อความรุนแรงของกระแสการไหล โดยกรณีที่ $W_R=0.10$ จะ ให้ความรุนแรงของกระแสการไหลที่สูงกว่ากรณี $W_R=0.20$ เมื่อ พิจารณาการกระจายอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหลพบว่า กรณี $W_R=0.10$ ให้การผสมกันของอากาศได้ดีกว่ากรณี $W_R=0.20$ โดยสามารถสังเกตได้จากชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ผนัง ของแผ่นดูดซับที่มีความหนาน้อยกว่านั่นเอง ส่งผลให้การแลกเปลี่ยน ความร้อนระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับเพิ่มขึ้น และการถ่ายเท ความร้อนที่ผนังเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 การกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนัง การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนและอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหล เส้นกระแสการไหล 3 มิติ และเส้นกระแสการไหล 2 มิติในระนาบขวางการไหลสำหรับ $W_R=0.20$, $H_R=0.10$ และ $Re=3000$



รูปที่ 10 การกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนัง การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วนและอุณหภูมิของอากาศในระนาบขวางการไหล เส้นกระแสการไหล 3 มิติ และเส้นกระแสการไหล 2 มิติในระนาบขวางการไหลสำหรับ $P_R=0.4$, $H_R=0.08$ และ $Re=3000$



รูปที่ 11 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ และการกระจายเลขนัสเซลล์ที่ผนังสำหรับ $W_R=0.20$, $H_R=0.10$ และ $Re=3000$

รูปที่ 11 แสดงถึงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ที่เกิดพฤติกรรม การไหลข้ามผนังของแผ่นดูดซับอันเป็นสาเหตุที่ทำให้การถ่ายเท ความร้อนลดลงถึงแม้ว่าจะมีค่า P_R ที่ต่ำกว่า จากรูปนำเสนอ สำหรับกรณี $W_R=0.20$, $H_R=0.10$ และ $Re=3000$ เดียวกัน และเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลและการถ่ายเทความร้อน

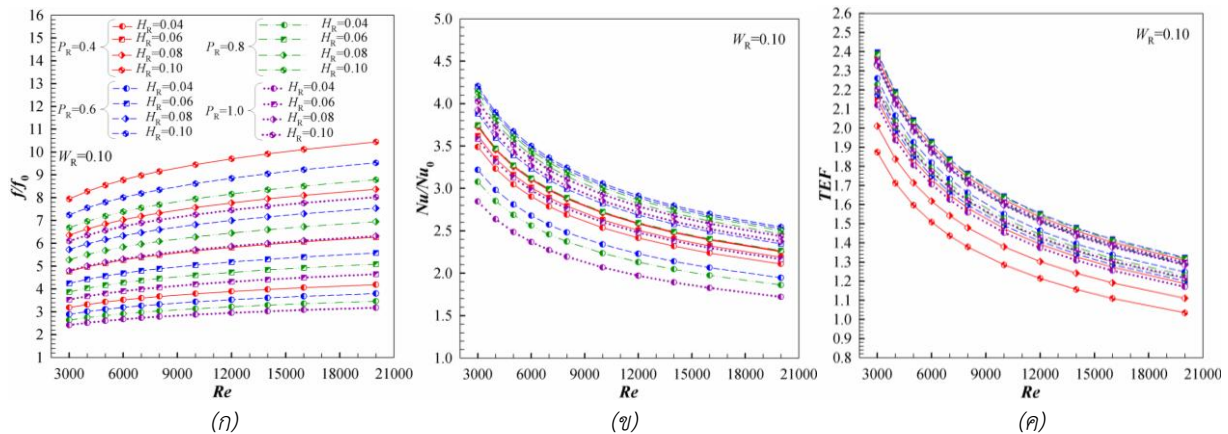
ระหว่างกรณี $P_R=0.4$ และ $P_R=0.6$ โดยพบว่าเมื่อระยะห่าง ระหว่างครีบอกัดกันจนเกินไปพร้อมทั้งมีค่าความสูงของครีบอกัด สูงเกินไปดังเช่นกรณี $P_R=0.4$, $Re=0.10$ จะทำให้กระแสของ อากาศเกิดการยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่กระแสเข้ากับ ผนัง ซึ่งทำให้พื้นที่ของแผ่นดูดซับถูกกระแสแตกได้น้อยลง

โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ราบเรียบระหว่างครีบริบที่บริเวณด้านหลังของปลายครีบริบ ซึ่งปรากฏพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำมากที่สุด ในขณะที่กรณี $P_R=0.6$ สามารถทำให้เส้นกระแสการไหลเกิดการกระแทกเข้ากับพื้นที่ราบเรียบระหว่างครีบริบได้มากกว่า ก่อนที่เส้นกระแสการไหลจะยกตัวขึ้น การกระแทกของอากาศที่ผนังจะทำให้ชั้นของไหลที่มีอุณหภูมิสูงถูกรบกวน ทำให้ของไหลและแผ่นดูดซับแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นนั่นเอง

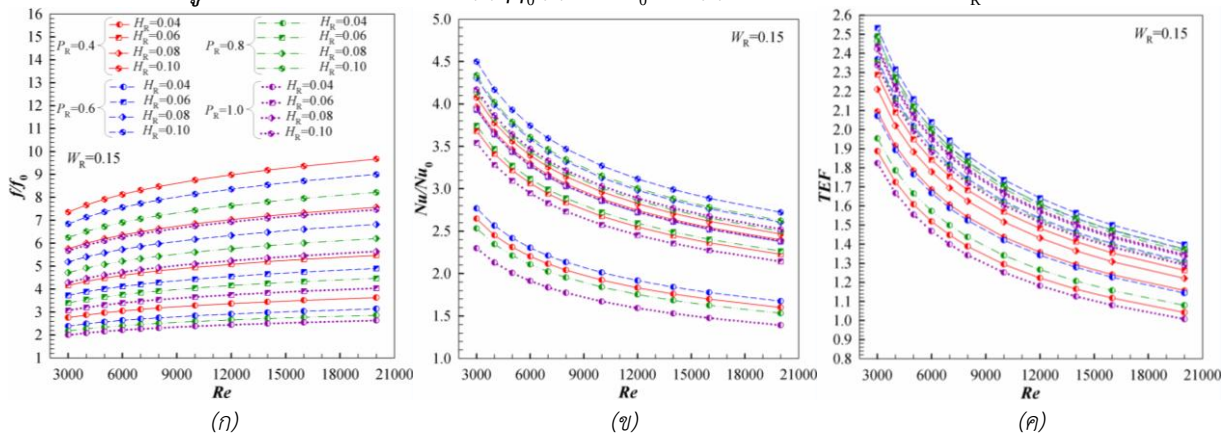
3.4 อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ และสมรรถนะเชิงความร้อน

รูปที่ 12-14 แสดงความสัมพันธ์ของค่า f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF กับค่า Re สำหรับทุก ๆ กรณีศึกษา จากรูปพบว่าครีบริบสี่เหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 และ TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น สำหรับทุก ๆ กรณีศึกษา ในช่วงที่ทำการศึกษาครีบริบสี่เหลี่ยมคางหมู

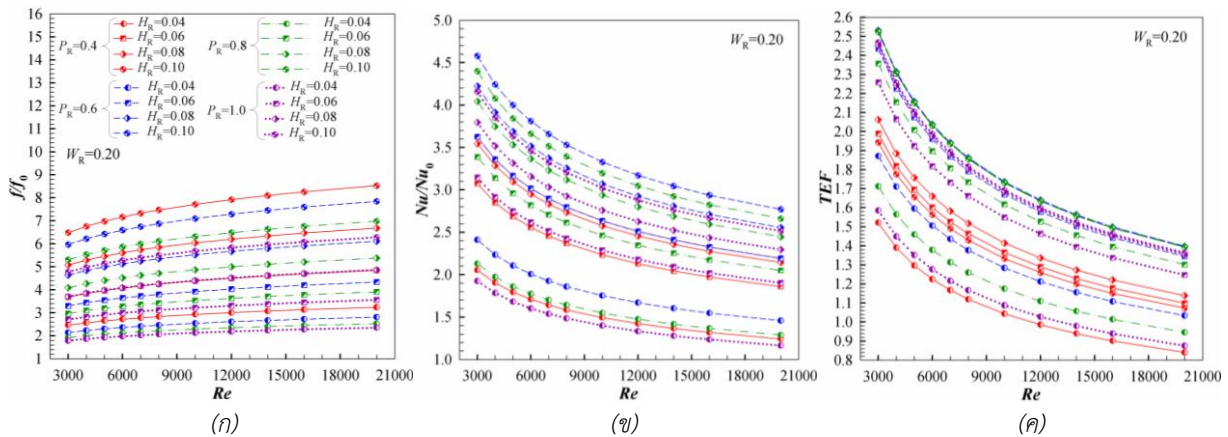
วางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับให้ค่า f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF ในช่วง 1.78-10.44, 1.16-4.57 และ 0.84-2.53 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบตามลำดับ กรณี $P_R=1.0$, $H_R=0.04$, $W_R=2.0$ และ $Re=3000$ ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดที่ค่า 1.78 เท่า เทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบ ส่วนกรณี $P_R=0.4$, $H_R=0.10$, $W_R=0.10$ และ $Re=20,000$ ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดที่ค่า 10.44 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบ สำหรับการถ่ายเทความร้อนพบว่ากรณี $P_R=1.0$, $H_R=0.04$, $W_R=2.0$ และ $Re=20,000$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดที่ค่า 1.16 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบ ส่วนกรณี $P_R=0.6$, $H_R=0.10$, $W_R=0.20$ และ $Re=3000$ ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดที่ค่า 4.57 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบ สำหรับสมรรถนะเชิงความร้อนพบว่ากรณี $P_R=0.4$, $H_R=0.04$, $W_R=2.0$ และ $Re=20,000$ ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดที่ค่า 0.84 แต่สำหรับกรณีที่ให้ค่า TEF สูงที่สุดนั้น มีทั้งหมด 3 กรณีคือ 1) $P_R=0.6$, $H_R=0.06$, $W_R=0.15$, 2) $P_R=0.6$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ และ 3) $P_R=0.8$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ โดยให้ค่าเท่ากับ 2.53 ที่ $Re=3000$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) f/f_0 (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF กับค่า Re สำหรับ $W_R=0.10$

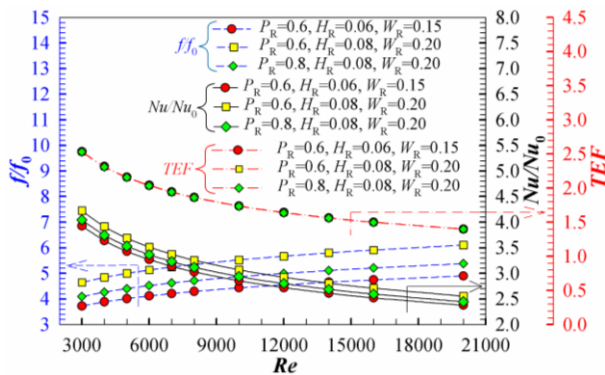


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) f/f_0 (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF กับค่า Re สำหรับ $W_R=0.15$



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) f/f_0 (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF กับค่า Re สำหรับ $W_R=0.20$

จากผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขพบว่ามี 3 กรณีที่ให้ค่า TEF สูงที่สุด ได้แก่กรณี 1) $P_R=0.6$, $H_R=0.06$, $W_R=0.15$, 2) $P_R=0.6$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ และ 3) $P_R=0.8$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ ดังนั้นรูปที่ 15 จึงแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสำหรับค่า f/f_0 และ Nu/Nu_0 ของทั้ง 3 กรณี จากรูปพบว่ากรณี $P_R=0.6$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ ให้ค่า f/f_0 และ Nu/Nu_0 สูงที่สุด โดยมีค่า f/f_0 สูงกว่ากรณี $P_R=0.6$, $H_R=0.06$, $W_R=0.15$ และ $P_R=0.8$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ เท่ากับ 24.6% และ 13.4 % ตามลำดับ และ มีค่า Nu/Nu_0 สูงกว่าเท่ากับ 7.5% และ 4.4% ตามลำดับ ดังนั้นในช่วงที่ทำการศึกษาทั้งหมดพบว่ากรณี $P_R=0.6$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ เป็นกรณีที่ดีที่สุดที่สามารถให้ค่า TEF และค่า Nu/Nu_0 ได้สูงที่สุด ซึ่งหากนำกรณีนี้ไปออกแบบในการประยุกต์ใช้งานจริงจะทำให้ได้เครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานที่ให้ค่า TEF สูงที่สุด และมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ นั่นเอง



รูปที่ 15 เปรียบเทียบกรณีที่ให้ค่า TEF สูงสุด

อิทธิพลของค่า H_R และ P_R ที่ค่า W_R ต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 16-17 โดยนำเสนอเฉพาะที่ค่า $Re=3000$ เนื่องจากทุก ๆ กรณีศึกษาให้

แนวโน้มของค่า f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF ไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเทียบกับค่า Re

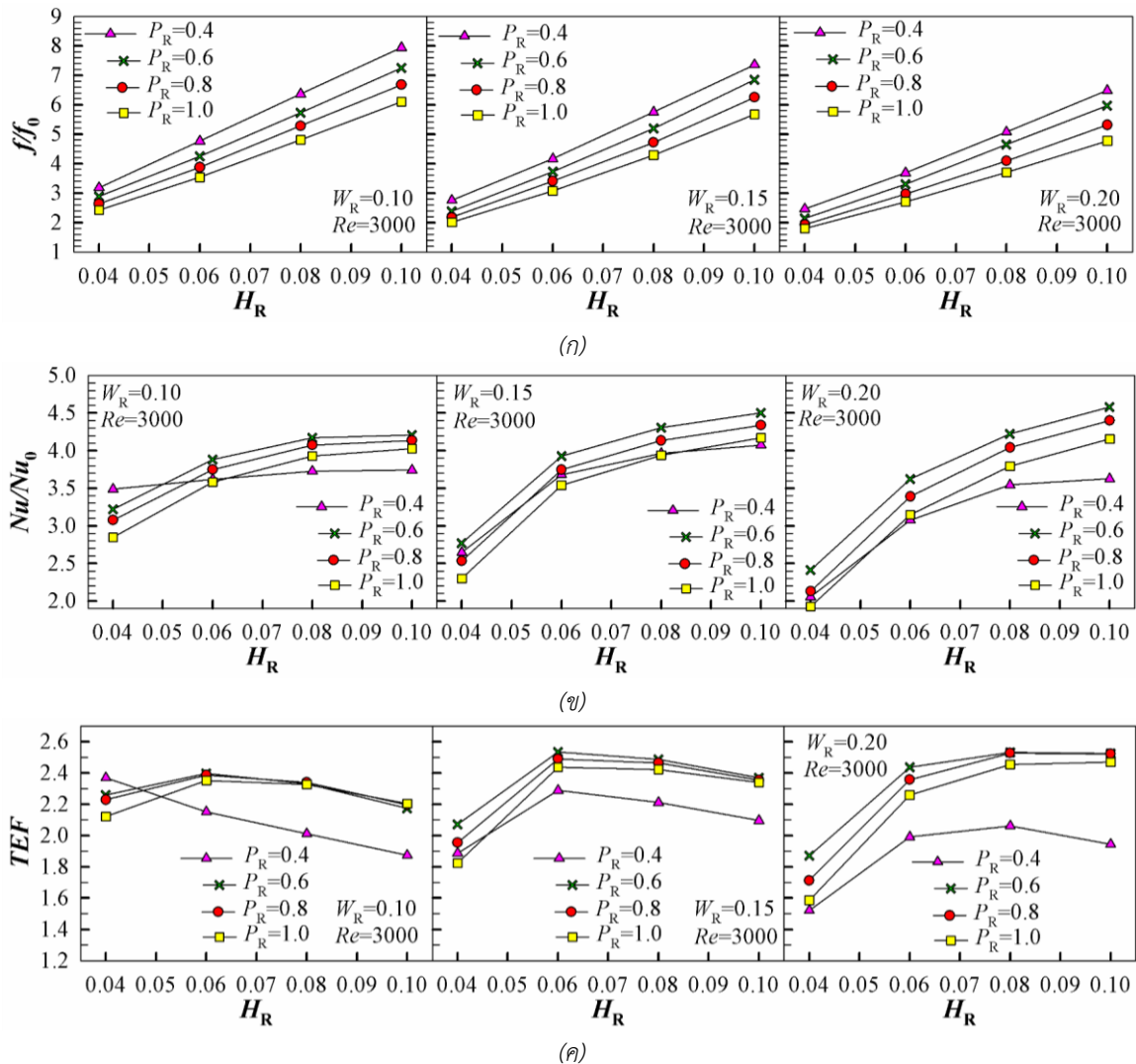
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่า H_R (พิจารณาที่ค่า P_R และ W_R เดียวกัน) ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าเมื่อค่า H_R เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสการไหลถูกขวางกั้นมากขึ้น และยังส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสการไหลกระทบเข้ากับผนังได้รุนแรงขึ้น ทำให้ชั้นขีดฉนวนถูกรบกวนได้มากขึ้น ในช่วงที่ทำการศึกษาพบว่ากรณี $H_R=0.06$, 0.08 และ 0.10 ให้ค่าเฉลี่ยของ f/f_0 สูงกว่ากรณี $H_R=0.04$ ในช่วง 46.1-166.8%, 46.9-187%, 46.8-187.5% และ 46.1-183.7% ตามลำดับ และพบว่าให้ค่าเฉลี่ยของ Nu/Nu_0 สูงกว่ากรณี $H_R=0.04$ ในช่วง 3.8-76.4%, 20.6-89.9%, 21.8-106.6% และ 25.8-115.9% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่า P_R (พิจารณาที่ค่า H_R และ W_R เดียวกัน) ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าเมื่อค่า P_R เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า f/f_0 ลดลง เนื่องจากกระแสการไหลสามารถไหลได้ง่ายยิ่งขึ้นนั่นเอง และส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 ลดลงเนื่องจากความรุนแรงในการกระทบผนังของกระแสการไหลลดลง ทำให้ชั้นขีดฉนวนถูกรบกวนได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามที่ค่า $P_R=0.4$ สำหรับบางค่า H_R ปรากฏค่า Nu/Nu_0 ต่ำกว่า P_R อื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ H_R เดียวกัน เนื่องจากที่ค่า P_R ต่ำ ๆ ครีบจะวางอยู่ใกล้กัน และเมื่อค่า H_R สูงเกินไปจะส่งผลให้กระแสการไหลไม่สามารถหมุนลงมาระลอกที่ผนังได้ทันก่อนจะไหลไปยัง module ถัดไป หรือกระแสการไหลยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นเอง จึงทำให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับลดลง ในช่วงที่ทำการศึกษาพบว่ากรณี $P_R=0.6$, 0.8 และ 1.0 ให้ค่าเฉลี่ยของ f/f_0 ต่ำกว่ากรณี $P_R=0.4$ ในช่วง 6.9-13.5%, 15-21.9% และ 22.8-27.4% ตามลำดับ และพบว่ากรณี $P_R=0.8$ และ 1.0 ให้ค่าเฉลี่ยของ Nu/Nu_0 ต่ำกว่ากรณี $P_R=0.6$ ในช่วง 1.6-11.7% และ 4.2-20.1% ตามลำดับ (กรณี $P_R=0.4$ ไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบเนื่องจากให้แนวโน้มของค่า Nu/Nu_0 แตกต่างจากค่า P_R

อื่น ๆ)

เมื่อพิจารณาว่า TEF พบว่ากรณีที่ทำให้ค่า TEF สูงสุด จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของค่าการถ่ายเทความร้อนกับค่าตัวประกอบเสียดทาน แต่จะไม่ปรากฏในกรณีที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูง

ที่สุดเนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูง ครีบสี่เหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับที่ค่า $P_R=0.6-0.8$ และ $H_R=0.06-0.08$ เป็นช่วงที่ดีที่สุดที่สามารถให้ค่า TEF สูงที่สุด



รูปที่ 16 อิทธิพลของ H_R และ P_R สำหรับ (ก) f/f_0 (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF ที่ค่า $Re=3000$

รูปที่ 17 แสดงถึงอิทธิพลของ W_R โดยนำเสนอเฉพาะที่ค่า $Re=3000$ เนื่องจากทุก ๆ กรณีศึกษาให้แนวโน้มของค่า f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF ไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเทียบกับค่า Re จากรูปพบว่าเมื่อค่า W_R เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ f/f_0 ลดลงในทุกๆ กรณี เนื่องจากพื้นผิวของครีบมีความเอียงเพิ่มมากขึ้นทำให้การไหลของอากาศไหลได้ง่ายยิ่งขึ้นนั่นเอง ในช่วงที่ทำการศึกษาค้นคว้ากรณี $W_R=0.15$ และ 0.20 ให้ค่าเฉลี่ยของ f/f_0 ต่ำกว่ากรณี $W_R=0.10$ ในช่วง 13.5-17.5% และ

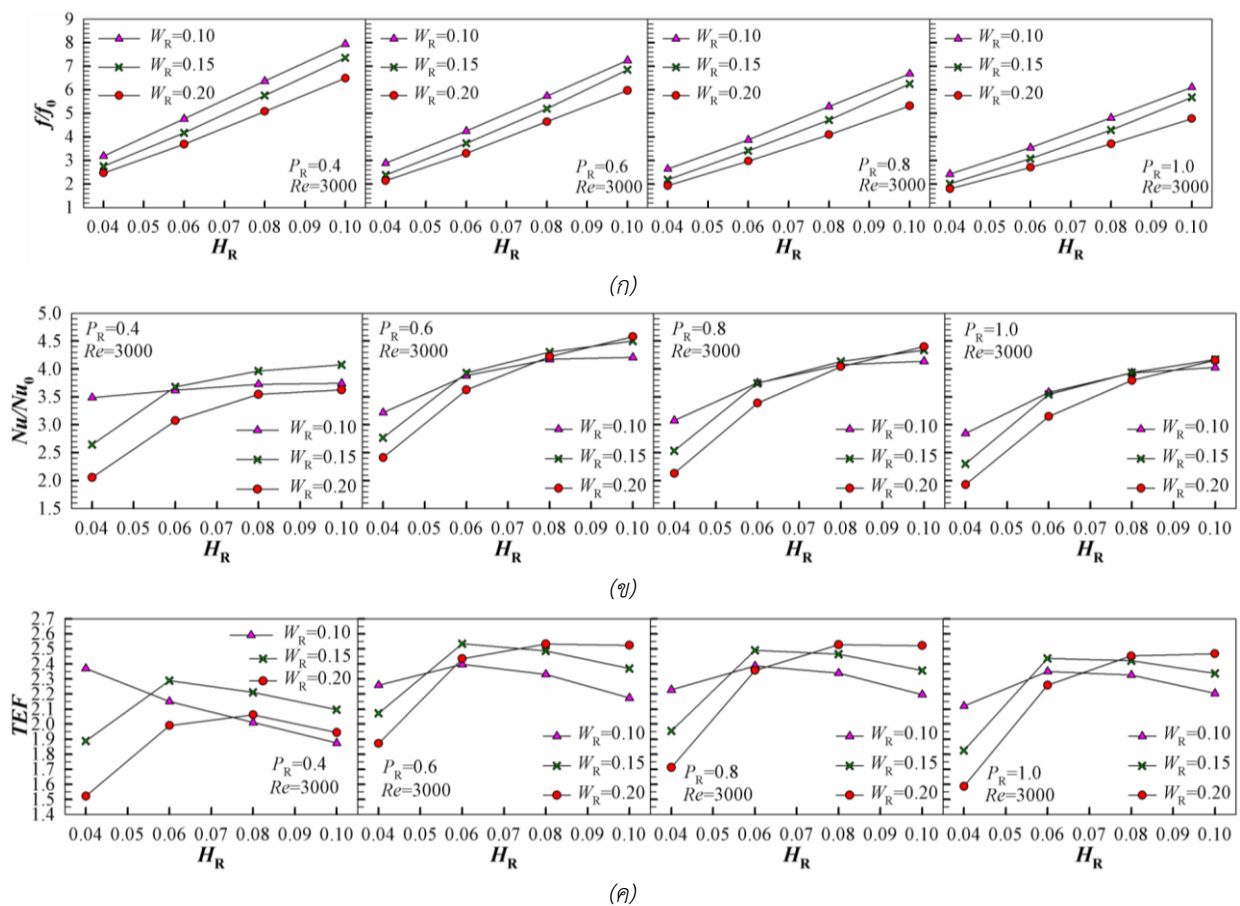
22.7-27% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนพบว่าโดยส่วนใหญ่เมื่อค่า W_R เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 ลดลง เนื่องจากกระแสการไหลที่กระแทกเข้ากับผนังท่ออ่อนแรงลง หรือระดับความรุนแรงในการหมุนวนลดลงนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามในกรณี $W_R=0.10$ ที่ค่า $H_R=0.06-0.10$ ในทุก ๆ ค่า P_R ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำกว่ากรณี $W_R=0.15$ และ 0.20 และที่ค่า $H_R=0.10$ ในกรณี $W_R=0.15$ ที่ค่า

$P_R=0.6-1.0$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำกว่ากรณี $W_R=0.20$ เนื่องจากการไหลข้ามพื้นที่บนแผ่นดูดซับ ส่งผลให้การกระแทกและการไหลมีผลกระทบกับผิวของแผ่นดูดซับได้น้อยลง จึงทำให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างอากาศและแผ่นดูดซับลดลงนั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่า TEF พบว่าที่ค่า P_R และ H_R ต่ำๆ กรณี $W_R=0.10$ จะให้ค่า TEF สูงที่สุด โดยเฉพาะที่ค่า $H_R=0.04$ เนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่า f/f_0 ไม่สูงมาก แต่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงกว่าค่า W_R อื่นๆ เนื่องจากความรุนแรงในการกระแทกผิวของแผ่นดูดซับของกระแสน้ำไหลที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ในขณะที่กระแสน้ำไหลยังสามารถมันลงไปที่กระแทกที่ผิวของแผ่นดูดซับได้ และไม่เกิดการไหลข้ามพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อนอันเนื่องมาจากความสูงครีปที่

สูงเกินไป แต่เมื่อค่า H_R เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า TEF ในกรณี $W_R=0.10$ ลดต่ำกว่าค่า W_R อื่นๆ เนื่องจากพฤติกรรมของการไหลข้ามพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อนของกระแสน้ำไหลนั่นเอง แต่เมื่อค่า H_R และ P_R เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสูงสุดของ TEF ปรากฏที่ค่า W_R ที่สูงขึ้น อันเนื่องมาจากกระแสน้ำไหลที่สามารถมันลงไปที่กระแทกกับพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นพร้อมกับความรุนแรงในการไหลที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำกว่ากรณี $W_R=0.10$ แต่อย่างไรก็ตาม กรณี $W_R=0.20$ ที่ค่า $H_R=0.08$, $P_R=0.6$ เป็นกรณีที่แนะนำให้นำไปประยุกต์ในการใช้งานจริง เนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่า TEF สูงที่สุด และยังให้ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดอีกด้วย



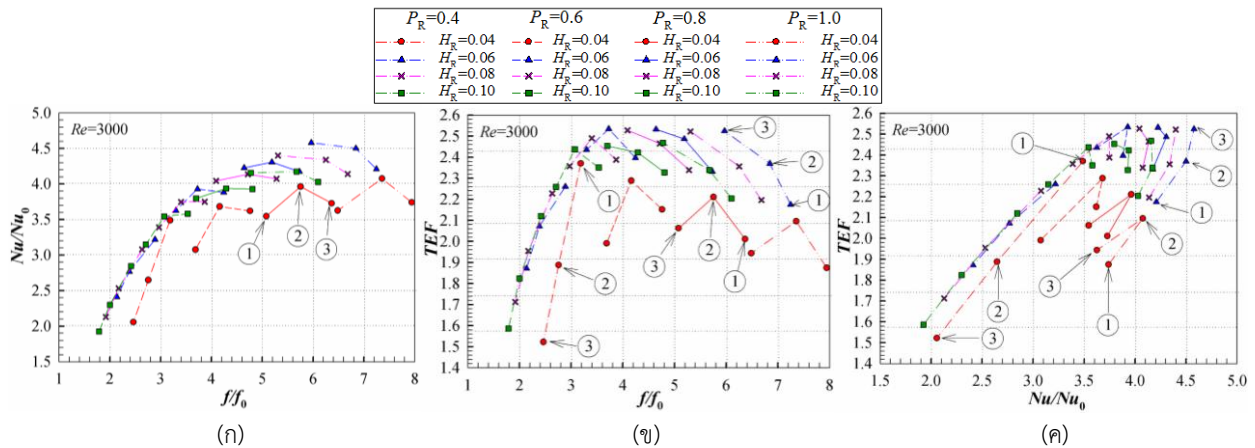
รูปที่ 17 อิทธิพลของ W_R สำหรับ (ก) f/f_0 (ข) Nu/Nu_0 และ (ค) TEF ที่ค่า $Re=3000$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ f/f_0 , TEF กับ f/f_0 และ TEF กับ Nu/Nu_0 สำหรับทุกกรณีศึกษาที่ค่า $Re=3000$ แสดงไว้ในรูปที่ 18 โดยตัวเลข 1, 2 และ 3 ในวงกลมคือค่า $W_R=0.10, 0.15$ และ 0.20 ตามลำดับ โดยรูปที่ 18 (ก) แสดงไว้ให้เห็นเพื่อความสะดวกในกรณีที่ต้องการเลือกตัวแปรสำหรับครีปสี่เหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววี

บนแผ่นดูดซับในช่วงที่ทำการศึกษา เพื่อนำไปใช้ออกแบบเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานโดยที่ไม่สนใจค่า TEF ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการออกแบบให้มีค่า Nu/Nu_0 ประมาณ 4.0 นั้น จะเห็นได้ว่ามีหลายกรณีที่ให้ค่า $Nu/Nu_0 \approx 4.0$ แต่อย่างไรก็ตาม กรณีที่ควรเลือกนำไปใช้ควรเป็นกรณีที่ให้ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุด เนื่องจาก

ทำให้สูญเสียกำลังขับของพัดลมน้อยที่สุดนั่นเอง ส่วนถ้าหากต้องการออกแบบให้มีค่า TEF สูงๆ เช่นที่ค่า TEF ประมาณ 2.5 โดยที่ไม่สนใจค่า Nu/Nu_0 ดังแสดงในรูปที่ 18 (ข) จะพบว่ามีความหลายกรณีที่ให้ค่า $TEF \approx 2.5$ ซึ่งกรณีที่ควรเลือกนำไปใช้ควรเป็นกรณีที่ให้ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุด เนื่องจากทำให้สูญเสียกำลังขับของพัดลมน้อยที่สุดนั่นเอง แต่ถ้าต้องการออกแบบให้มีค่า TEF และค่า Nu/Nu_0 ที่สูง โดยที่ไม่สนใจค่า f/f_0 ดังแสดงในรูปที่ 18 (ค) จะเห็นว่ามีความหลายกรณีที่ให้ค่า

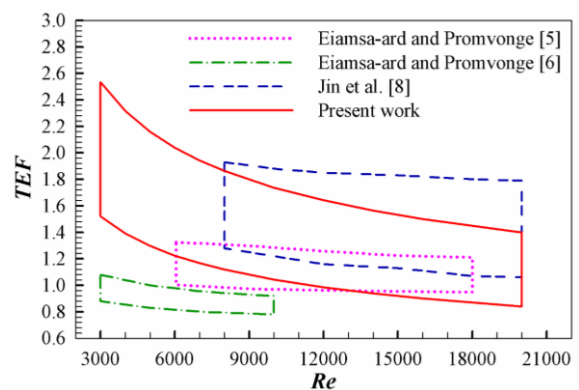
TEF ใกล้เคียงกัน โดยกรณีที่ควรเลือกนำไปใช้ควรเป็นกรณีที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุด เนื่องจากสามารถออกแบบให้เครื่องปรับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานมีขนาดเล็กที่สุดเพราะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการออกแบบที่ค่า Re อื่นๆ ก็สามารถเลือกได้จากรูปที่ 12 - 14 และสามารถใช้รูปที่ 18 เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรก่อนจะเลือกนำไปใช้ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Nu/Nu_0 กับ f/f_0 (ข) TEF กับ f/f_0 และ (ค) TEF กับ Nu/Nu_0 สำหรับทุกกรณีที่ค่า $Re=3000$

3.5 เปรียบเทียบผลระหว่างครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับกับงานวิจัยที่ผ่านมา

รูปที่ 19 แสดงถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องปรับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานที่มีครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเปรียบเทียบกับครีบบางขวางการไหลของ Eiamsa-ard และ Promvonge [5], Eiamsa-ard และ Promvonge [6] และครีบบางรูปตัววีที่มีผนังครีบบางขวางการไหลของ Jin และคณะ [8] ด้วยการนำเสนอในรูปแบบกราฟพื้นที่โดยใช้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่า TEF เป็นเส้นขอบบนและล่างตามลำดับ จากรูปพบว่าบางกรณีสำหรับครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีสามารถให้ค่า TEF สูงกว่าครีบบางรูปตัววีที่มีผนังครีบบางขวางการไหลของ Jin และคณะ [8] เนื่องจากให้ค่า f ที่ต่ำกว่ามาก ในขณะที่ค่า Nu ลดลงไม่มากนัก นอกจากนี้ครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววียังสามารถให้ค่า TEF ที่สูงกว่าครีบบางขวางการไหลอีกด้วย เนื่องจากสามารถเพิ่มค่า Nu ได้สูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของกระแสการไหลหมุนวนคู่แบบสวนทางกัน ในขณะที่ค่า f ไม่สูงเกินไปนั่นเอง



รูปที่ 19 เปรียบเทียบค่า TEF ระหว่างครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับกับงานวิจัยที่ผ่านมา

4. สรุปผล

อิทธิพลของครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับในเครื่องปรับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ถูกนำเสนอด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่า $Re=3000-20,000$ โดยครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีมีมุมปะทะการไหล $\alpha=30^\circ$, $Pr=0.4-1.0$, $H_s=0.04-0.10$, $W_s=0.10-0.20$ ที่ค่า t/H คงที่เท่ากับ

0.05 จากผลการจำลองพบว่า

1. การไหลและการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานที่มีครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับเข้าสู่การพัฒนาเต็มพื้นที่ตำแหน่ง $x/H=10$

2. ครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับเหนี่ยวนำให้อากาศกระแทกที่ผนังของแผ่นดูดซับและเกิดพฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนคู่สวนทางกันในลักษณะ common flow down เป็นสาเหตุให้กระแสของอากาศกระแทกที่ผนังของแผ่นดูดซับ ทำให้ชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงที่บริเวณใกล้ผนังของแผ่นดูดซับบางลง อากาศผสมกันได้ดีขึ้นและการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

3. การเพิ่มขึ้นของ Re ส่งผลให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 และ TEF มีแนวโน้มลดลงสำหรับทุกๆ กรณี ส่วนการเพิ่มขึ้นค่า HR ส่งผลให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้น เนื่องกระแสการไหลถูกขวางกั้นมากขึ้น และส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระแสน้ำไหลกระแทกเข้ากับผนังได้รุนแรงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่า P_R และ W_R ให้คำตอบตรงกันข้าม แต่หากกรณีใดที่ส่งผลให้กระแสการไหลเกิดการไหลข้ามพื้นที่ของแผ่นดูดซับ กรณีนั้นจะให้การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ระยะห่างระหว่างครีบลีเหลี่ยมคางหมูเกินไปพร้อมทั้งมีค่าความสูงของครีบลีเหลี่ยมคางหมูเกินไป

4. ในช่วงที่ทำการศึกษาค้นคว้าสำหรับเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานที่มีครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับให้ค่า f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF ในช่วง 1.78-10.44, 1.16-4.57 และ 0.84-2.53 เท่าเมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับผิวเรียบ โดยกรณี $P_R=0.6$, $H_R=0.08$, $W_R=0.20$ เป็นกรณีที่ดีที่สุดที่สามารถให้ค่า Nu/Nu_0 และค่า TEF ได้สูงที่สุดที่ 4.57 และ 2.53 เท่า ที่ค่า $Re=3000$ ตามลำดับ

5. เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องขนานที่มีครีบลีเหลี่ยมคางหมูวางรูปตัววีบนแผ่นดูดซับ (มีผนังครีบลีเหลี่ยมคางหมูกับการไหล) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูกับการไหล แต่ก็สามารถทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงได้เช่นกัน ทำให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูกับการไหล อีกทั้งยังให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูกับการไหลอีกด้วย

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)
b	ความกว้างของฐานครีบลีเหลี่ยมคางหมู (m)
C_{1e}	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน (-)
C_{2e}	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน (-)
C_{3e}	ระดับของ ε เนื่องจากแรงลอยตัว (-)

C_μ	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน (-)
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
e	ความสูงครีบลีเหลี่ยมคางหมู (m)
f	ตัวประกอบเสียดทาน (-)
f_0	ตัวประกอบเสียดทานสำหรับแผ่นดูดซับผิวเรียบ (-)
G_b	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว ($kg\ s^{-3}$)
G_k	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเฉือนของความเร็วย่อย ($kg\ s^{-3}\ m^{-1}$)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
h_x	ความสูงครีบลีเหลี่ยมคางหมู, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
H	ความสูงของท่อช่องขนาน (m)
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน (m^2/s^2)
k_a	ค่าการนำความร้อนของอากาศ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
Nu	เลขนัสเซิลต์ (-)
Nu_0	เลขนัสเซิลต์สำหรับแผ่นดูดซับผิวเรียบ (-)
Nu_x	เลขนัสเซิลต์เฉพาะที่ (-)
p	ระยะห่างระหว่างครีบลีเหลี่ยมคางหมู (m)
P	ความดัน (N/m^2)
P_R	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบลีเหลี่ยมคางหมู, p/H (-)
Pr	เลขพรานด์ (-)
Pr_t	เลขพรานด์ปั่นป่วน (-)
H_R	อัตราส่วนความสูงครีบลีเหลี่ยมคางหมู, e/H (-)
Re	เลขเรย์โนลด์ส (-)
S_k	user-defined source term สำหรับ k ($kg\ m^{-1}\ s^{-3}$)
S_ε	user-defined source term สำหรับ ε ($kg\ m^{-1}\ s^{-4}$)
t	ความกว้างของปลายครีบลีเหลี่ยมคางหมู (m)
T	อุณหภูมิ (K)
TEF	สมรรถนะเชิงความร้อน (-)
u_0	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
u_i	องค์ประกอบความเร็วในทิศทาง x_i (m/s)
u'_i	ความผันผวนของความเร็วในทิศทาง x_i (m/s)
u_j	องค์ประกอบความเร็วในทิศทาง x_j (m/s)
u'_j	ความผันผวนของความเร็วในทิศทาง x_j (m/s)
x_i, x_j	ทิศทางของพิกัด (m)
W	ความกว้างของท่อช่องขนาน (m)
W_R	อัตราส่วนความกว้างของฐานครีบลีเหลี่ยมคางหมู, b/W (-)

รายการสัญลักษณ์กรีก

ρ	ความหนาแน่น ($kg\ m^{-3}$)
μ	ความหนืด ($kg\ s^{-1}\ m^{-1}$)

μ_t	ความหนืดปั่นป่วน ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
Γ	การแพร่ทางความร้อน ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
Γ_t	การแพร่ทางความร้อนปั่นป่วน ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
α	มุมปะทะการไหล (degree)
ε	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$)
σ_k	เลขพารามิเตอร์ปั่นป่วนสำหรับ k (-)
σ_ε	เลขพารามิเตอร์ปั่นป่วนสำหรับ ε (-)
δ_{ij}	Kronecker delta (m)

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Karwa, S.C. Solanki and J.S. Saini; “Thermo-hydraulic Performance of Solar Air Heaters Having Integral Chamfered Rib Roughness on Absorber Plates”, *Energy*, Vol. 26, pp. 161–176. 2001.
- [2] A.-M. Ebrahim Momin, J.S. Saini and S.C. Solanki; “Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with V-shaped Rib Roughness on Absorber Plate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3383–3396. 2002.
- [3] R. Karwa; “Experimental Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The Heated Wall in Transverse, Inclined, V-continuous and V-discrete Pattern”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3383–3396. 2003.
- [4] A.R. Jaurker, J.S. Saini and B.K. Gandhi; “Heat Transfer and Friction Characteristics of Rectangular Solar Air Heater Duct using Rib-grooved Artificial Roughness”, *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 895–907. 2006.
- [5] S. Eiamsa-ard and P. Promvong; “Numerical Study on Heat Transfer of Turbulent Channel Flow Over Periodic Grooves”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 844–852. 2008.
- [6] S. Eiamsa-ard and P. Promvong; “Thermal Characteristics of Turbulent Rib-grooved Channel Flows”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 705–711. 2009.
- [7] G. Tanda; “Performance of Solar Air Heater Ducts with Different Types of Ribs on The Absorber Plate”, *Energy*, Vol. 36, pp. 6651–6660. 2011.
- [8] D. Jin, M. Zhang, P. Wang and S. Xu; “Numerical Investigation of Heat Transfer and Fluid Flow in A Solar Air Heater Duct with Multi V-shaped Ribs on The Absorber Plate”, *Energy*, Vol. 89, pp. 178–190. 2015.
- [9] R. K. Ravi and R.P. Saini; “Experimental Investigation on Performance of A Double Pass Artificial Roughened Solar Air Heater Duct Having Roughness Elements of The Combination of Discrete Multi V Shaped and Staggered Ribs”, *Energy*, Vol. 116, pp. 507–516. 2016.
- [10] D. S. Thakur, M. K. Khan, M. Pathak; “Solar Air Heater with Hyperbolic Ribs: 3D Simulation with Experimental Validation”, *Renewable Energy*, Vol. 113, pp. 357–368. 2017.
- [11] S.V. Patankar; “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [12] F. Incropera and P.D. Dewitt; “Introduction to Heat Transfer”, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2006.
- [13] P. Promvong and C. Thianpong; “Thermal Performance Assessment of Turbulent Channel Flows Over Different Shaped Ribs”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 1327–1334. 2008.



ดร. พิทักษ์ พร้อมโรสง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประเทศไทย



รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย ระดับปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล Imperial College London, University of London ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย