



## ผลของระยะห่างระหว่างรอยนูนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวภายในอุโมงค์ลม The Effect of Protrusion-to-protrusion Spacing on Heat Transfer Characteristics on the Internal Surface of Wind Tunnel

<u>มงคล เกื้อสกุล</u> ปฐมพร นะระโต ชยุต นันทดุสิต และ มักตาร์ แวหะยี\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 \*ติดต่อ: E-mail: wmakatar.eng.psu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 074-287-231, เบอร์โทรสาร: 074-558830

#### บทคัดย่อ

ในบทความนี้ ได้นำเสนอผลของการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งรอยนูนแบบแถว ชุดทดลองเป็น แบบอุโมงค์ลมที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นผิวภายในอุโมงค์ลมได้ติดตั้งรอยนูน จำนวน 4 อัน เรียงเป็นแบบแถวตั้งฉาก กับการไหลภายในอุโมงค์ลม รอยนูนเป็นแบบทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนที่ยื่นออกจากพื้นผิว (รอยปริ้น) *D*=27.0 mm ความสูงของส่วนที่ยื่นออกจากพื้นผิว *H*=0.22*D* โดยปรับระยะห่าง ระหว่างรอยนูน *S*=1.125*D*, 1.25*D*, 1.5*D* และ 2*D* สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลภายในอุโมงค์ลม ในการวัดการ ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่น Thermochromic liquid crystal วัดอุณหภูมิที่กระจายบนพื้นผิว จากผลการศึกษา พบว่าที่ระยะ *S*=1.125*D* ให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด **คำหลัก:** รอยนูน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

#### Abstract

This article, the study of heat transfer on the surface mounted protrusions with inline arrangement was presented. Experimental setup was wind tunnel with rectangular cross section. 4 protrusions were installed perpendicularly to air flow inside the tunnel. The protrusions were sphere with a diameter of 40 mm, and the printed diameter of protrusions on the surface was D=27.0 mm. The height of protrusions was H=0.22D. A protrusion-to-protrusion spacing were adjusted at S=1.125D, 1.25D, 1.5D and 2D. The Reynolds number of air flow inside the wind tunnel, based on hydraulic diameter of air flow inside the wind tunnel, was fixed at Re=20,000. The heat transfer on the surface was evaluated by measuring temperature distributions using a thermochromic liquid crystal sheet. The results show that the heat transfer rate for the case of S=1.125D was the highest.

Keywords: Protrusion, Heat transfer enhancement, Heat transfer coefficient

#### 1. บทนำ

การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีหนึ่ง ที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะใน กระบวนการที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น กระบวนการการให้ความร้อน การระบายความร้อน การทำให้แห้งบนพื้นผิว หรือในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ร้อน ซึ่งกระบวนการส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความ ร้อนแบบการพาความร้อน หากสามารถออกแบบระบบ ให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง จะสามารถลด การใช้พลังงานของปั๊ม พัดลม หรือลดขนาดและน้ำหนัก ของอุปกรณ์ รวมถึงต้นทุนในการผลิต

สำหรับวิธีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ ร้อนสามารถทำได้โดยการลดความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary layer) หรือทำลายชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้น ระหว่างของไหลกับพื้นผิว เนื่องจากภายในชั้นขอบเขต ของไหลมีความเร็วต่ำเหมือนเป็นชั้นฉนวนความร้อน





สำหรับจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผล ของระยะห่างระหว่างรอยนูนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน บนพื้นผิว โดยติดตั้งรอยนูนทรงกลมจำนวน 4 อัน เรียง เป็นแบบแถวตั้งฉากกับการไหลที่เป็นแบบพัฒนาตัวแล้ว (Fully developed flow) ภายในอุโมงค์ลม



รูปที่ 1 ลักษณะพื้นผิวที่มีรอยรอยนูน (Protrusion) ที่ใช้ ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์ด้านความ ร้อน [2]



#### 2. วิธีการทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
รูปที่ 3 และ 4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการศึกษา จาก
รูปรอยนูนจำนวน 4 อัน 1 แถว ทำมาจากพลาสติก

สำหรับการลดความหนาของชั้นขอบเขตสามารถทำได้ โดยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหล แต่วิธีนี้จำเป็นต้อง เพิ่มกำลังของพัดลมหรือปั้ม ส่วนวิธีการทำลายชั้น ขอบเขตสามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความ ปั่นป่วน (Turbulators) เช่น กลุ่มของริบส์ (Ribs) หรือพินส์ (Pins) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งวิธี ดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเพิ่มความเร็วของของไหล เนื่องจาก ชั้นขอบเขตการไหลจะถูกทำลายเมื่อของไหลไหลผ่าน อุปกรณ์ที่ติดตั้ง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จำเป็นที่จะต้อง คำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น [1]

การทำให้ผิวเป็นรอยนูน (Protrusions) เป็นวิธี หนึ่งที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว รูปที่ 1 แสดงการออกแบบครีบระบายความร้อนให้เป็นรอยนูน เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน [2] สำหรับรูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลผ่านรอยนูน ลักษณะการ ไหลจะเกิดการแยกตัว (Separation flow) บริเวณต้น ทางของรอยนูน บริเวณนี้จะเกิดกระแสหมุนวนขนาดเล็ก เมื่อของไหลผ่านรอยนูนจะเกิดการไหลแบบเกาะติดผนัง อีกครั้ง (Reattachment flow) บนพื้นผิวเรียบด้าน ปลายทางการไหลของรอยนูน โดยบริเวณปลายทางการ ไหลที่เป็นพื้นผิวโค้งของรอบนูนจะเกิดเป็นกระแสหมุนวน ที่อยู่กับที่ บริเวณที่เกิดการไหลเป็นกระแสหมุนวนอยู่กับ ที่เป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ และบริเวณที่มี การไหลแบบเกาะติดผนังอีกครั้งเป็นบริเวณที่มีการถ่ายเท ความร้อนสูง

สำหรับจุดเด่นของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้ผิวเป็นรอยเว้าหรือรอยนูน คือ รอยนูนมี ขนาดบางเมื่อเทียบกับริบ ปีก หรือพิน ทำให้สามารถลด การใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์ทางความร้อน รวมถึง สามารถลดการสูญเสียความดันในระบบ [3-6] นักวิจัยได้ พยายามศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลและการถ่ายเท ความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณที่มีกลุ่มของรอยเว้าหรือรอย นูน เช่น Rao และคณะ [7], Katkhaw และคณะ [8] Xie และคณะ [9]

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาลักษณะการไหลและ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีรอยเว้าหรือรอยนูน กรณีที่เป็นแบบกลุ่ม พบว่า มีความยากลำบากที่จะ อธิบายปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากผลของรอยนูนหรือรอยเว้าที่อยู่รอบๆ ดังนั้น นักวิจัยได้ศึกษาลักษณะการไหลกรณีของรอยเว้าหรือรอย นูนหนึ่งอันที่ติดบนพื้นผิว [10-12]





ติดตั้งบนพื้นผิวภายในอุโมงค์ลม โดยเรียงเป็นแบบแถวตั้ง ฉากกับการไหลภายในอุโมงค์ลม สำหรับอุโมงค์ลมมีหน้า ตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 300 mm สูง 26 mm อุโมงค์ลมมีความยาวยาวเพียงพอที่จะทำให้การไหลเป็น แบบ Fully developed flow สำหรับระบบพิกัดฉาก เริ่มต้นที่ตรงกลางระหว่างรอยเว้าหรือรอยนูน โดย กำหนดให้แกน X อยู่ในแนวเดียวกับการไหลภายใน อุโมงค์ลม แกน Y อยู่ในแนวเดียวกับความสูงอุโมงค์ลม และแกน Z อยู่ในแนวตั้งฉากกับการไหล



รูปที่ 4 โมเดลที่ใช้ในการทดลองแบบ 2-D

ออกจากพื้นผิวมีความสูง H=0.22D ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วง เดียวกับงานวิจัยในอดีต [7] สำหรับความเร็วของอากาศ ภายในอุโมงค์ลมกำหนดให้คงที่ที่เรยโนล์ดนัมเบอร์ Re=20,000 โดยพิจารณาความเร็วที่กึ่งกลางอุโมงค์ลม วัดความเร็วโดยใช้ Pitot tube ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 6

### 2.2 อุโมงค์ลม

รูปที่ 6 แสดงอุโมงค์ลมที่จะใช้ในการทดลอง จากรูปอุโมงค์ลมมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 300 mm สูง 26 mm โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วน ทางเข้าอุโมงค์ลมก่อนเข้าสู่ Test section ออกแบบให้มี ความยาวเพียงพอที่การไหลเป็น Fully developed flow ส่วนของ Test section ออกแบบให้ผนังอุโมงค์ลม สามารถติดตั้งแผ่นที่มีรอยเว้าและรอยนูนได้ และผนังที่ เจ็ทพุ่งชนจะออกแบบให้สามารถเปลี่ยนถอด-ประกอบ



รูปที่ 5 รูปแบบของรอยเว้าและรอยนูนที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะห่าง ระหว่างรอยเว้าหรือรอยนูน S=1.125D, 1.25D, 1.5D และ 2D โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพ ฉายรอยนูนทรงกลมมีค่าคงที่เท่ากับ 27.0 mm สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนทรงกลมมีค่าท่ากับ 40 mm ตามที่ได้แสดงรายละเอียดในรูปที่ 5 โดยส่วนที่ยื่น



# TSF0022



สำหรับดูดลมเข้าอุโมงค์ลม

เพื่อใช้วัดการถ่ายเทความร้อน ส่วนของอุโมงค์ลมหลัง Test section จะต่อกับ Blower ที่อยู่ปลายทางการไหล



รูปที่ 6 ลักษณะชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับอัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสเตนเลสสา มารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{input} = I^2 \cdot R \tag{1}$$

ในที่นี้ / คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส และ R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส

จากนั้นอากาศที่ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ไหล ผ่านบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เฉพาะจุดบนพื้นผิว (*h*) ได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_{LC} - T_a)}$$
(2)

โดยที่  $\dot{Q}_{_{input}}$ คือ อัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสเตนเลส

 $\dot{Q}_{losses}$  คือ อัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการ แผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผนัง ด้านหลังของแผ่นสเตนเลสที่ติดแผ่น TLC

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

*T<sub>LC</sub>* คือ อุณหภูมิของเส้นแถบสีที่ปรากฏบนแผ่น
TLC

*T<sub>a</sub>* คือ อุณหภูมิของอากาศ

2.3 วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว จากรูปที่ 6 แสดงชุด Test section เป็นบริเวณที่ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน เฉพาะจุดบนพื้นผิว อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการถ่ายเท ความร้อนบนพื้นผิวประกอบด้วย แผ่นพลาสติกหนา 10 mm เป็นผนังอุโมงค์ลม บริเวณตรงกลางถูกเจาะเป็นช่อง หน้าต่างสำหรับวัดอุณหภูมิและขึงแผ่นสเตนเลสบาง ที่มี ความหนา 0.030 mm ให้เรียบและตึงสำหรับใช้เป็น พื้นผิวให้ความร้อน โดยปลายทั้งสองข้างต่อเข้ากับแท่ง ทองแดง ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่ง ทองแดงเพื่อให้เกิดความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นสเตน เลส และจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน ไฟฟ้าเพื่อที่จะคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นสเตน เลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจะวัดโดยใช้ แผ่น Themochromic liquid crystals (TLC) ติดบน แผ่นสเตนเลสด้านตรงข้ามการไหล ซึ่งแผ่น TLC ที่ใช้จะ แสดงการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำ เงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อนใช้แผ่น TLC จะต้องทำ การสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏก่อนใช้วัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบอุณหภูมิจะใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพสี ของแผ่น TLC ที่อุณหภูมิต่างๆและใช้วิธีทาง Image Processing เพื่อเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูล ส่วนประกอบของสี R, G, B และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิ



#### การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

15 20 25 10 Nu 1.25 (a) S/D=1.125 20 20 S1819  $\begin{bmatrix} 0 \\ Z \end{bmatrix} 0$ -1.25 1.50 (b) S/D=1.25 0 Z -1.50 -1.75 (c) S/D=1.5 0 -1.752.00 (d) S/D=2.0 -2.00 0 X/D

รูปที่ 7 นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว (วงกลมทึบ คือตำแหน่งรอยนูน, Re<sub>H</sub>=20,000)

รูปที่ 8 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายตามแนว ศูนย์กลางรอยนูน สำหรับบริเวณที่อยู่ในช่วง

จากนั้นสามารถคำนวณค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) บนพื้นผิวได้จากสมการ

**TSF0022** 

$$Nu = \frac{hD_H}{k} \tag{3}$$

ในที่นี้ D<sub>H</sub> คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของอุโมงค์ลม และ *k* คือค่าการนำความร้อนของอากาศ

สำหรับนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถวัด ได้จากการเฉลี่ยอุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนแล้ว น้ำไปแทนในสมการที่ (2) ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนเฉลี่ย จากนั้นจึงนำมาแทนในสมการที่ (3)

#### 3. ผลการทดลอง

ผลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะพิจารณา เฉพาะรอยนูนที่อยู่ตรงกลาง 2 อัน รูปที่ 7 แสดงนัสเซิลต์ นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่ติดรอยนูน สำหรับวงกลม ทึบที่แสดงบนพื้นผิวคือตำแหน่งรอยนูน จากรูปพบว่า บริเวณด้านหลังรอยนูน นัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการไหลแบบเกาะติดผนังอีกครั้ง (Reattachment flow) สำหรับผลของระยะห่างระหว่าง รอยนูนพบว่า นัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่าง ระหว่างรอยนูนแคบลง

โดยทั่วไปแล้ว การไหลด้านหลังรอยนูนจะเกิด กระแสหมุนวนอยู่กับที่ (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) ซึ่งจะมีผลทำ ให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ สำหรับในการ ทดลองครั้งนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเห็นได้ชัดใน กรณีระยะ S/D=2.0 (รูปที่ 7 (d)) ซึ่งด้านหลังรอยนูน ปรากฏเป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ อย่างไรก็ ตาม เมื่อระยะห่างระหว่างรอยนูนแคบลง บริเวณที่มีการ ถ่ายเทความร้อนต่ำดังกล่าวจะแคบลง ซึ่งอาจจะเป็นผล มาจากการรบกวนการไหลระหว่างกระแสไหลวนที่ไหล ผ่านรอยนูนแต่ละอัน ทำให้การไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น

# TSF0022



 -0.5D≤X/D≤0.5D จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเป็น บริเวณที่อยู่ใต้พื้นผิวรอยนูน จากรูปพบว่านัสเซิลต์นัม สูงสุด (Peak) แต่ละกรณีเกิดขึ้นในช่วง
0.75D≤X/D≤1.25D โดยที่กรณีระยะ S/D=1.125 ให้ ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดสูงกว่ากรณีอื่นๆ



รูปที่ 8 นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวตามแนว ศูนย์กลางรอยนูน (Z/D=0.625 สำหรับ S/D=1.125, Z/D=0.75 สำหรับ S/D=1.25, Z/D=0.875 สำหรับ S/D=1.5, Z/D=1.0 สำหรับ S/D=2.0, Re<sub>H</sub>=20,000)



รูปที่ 9 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายตามแนว ระหว่างรอยนูน (ที่ตำแหน่ง Z/D=0) สำหรับกรณี S/D=1.5 และ 2 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัม เบอร์ตามแนวนี้เกือบเป็นเส้นตรงคงที่ตามแนวแกน X สำหรับกรณี S/D=1.25 นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่อยู่ในช่วง 1D≤X/D≤3D มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณ ศูนย์กลางที่ติดรอยนูน (X/D=0) สำหรับกรณี S/D=1.125 บริเวณศูนย์กลางที่ติดรอยนูน (X/D=0) พบว่ามีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับการ กระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 (a) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากเกิดการไหลแบบแยกตัวจาก พื้นผิว ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีระยะห่างระหว่างรอยนูน ที่แคบ

รูปที่ 10 และ 11 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ กระจายบนพื้นผิวตามแนวขวางการไหลที่ระยะ X/D=1.0 และ 2.0 ตามลำดับ จากรูปพบว่านัสเซิลต์นัมสูงสุด (Peak) ในแต่ละกรณีเกิดขึ้นสองตำแหน่งใกล้เคียงกับ ตำแหน่งตามแนวศูนย์กลางของการติดรอยนูน โดยระยะ Peak ทั้งสองห่างมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างรอยนูน เพิ่มขึ้น





รูปที่ 12 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนว ขวางการไหล และรูปที่ 13 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่เฉลี่ย ทั้งพื้นผิว โดยผลที่แสดงในรูปทั้งสองจะไม่พิจารณา บริเวณที่อยู่ใต้พื้นผิวรอยนูน จากรูปพบว่านัสเซิลต์นัม เบอร์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างรอยนูนแคบ ลง โดยที่กรณีระยะ S/D=1.125 ให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ เฉลี่ยสูงกว่ากรณีอื่นๆ









รูบท 13 นสเซลตนมเบอรทเฉลยทงพนผว (-1.0≤*X/D≤3* -1.25≤Z/D≤1.25 สำหรับ S/D=1.125, -1.50≤Z/D≤1.50 สำหรับ S/D=1.25, -1.75≤Z/D≤1.75 สำหรับ S/D=1.5, -2.0≤Z/D≤2.0 สำหรับ S/D=2.0)

#### 4. สรุป

ในบทความนี้ ได้ติดตั้งรอยนูนทรงกลมจำนวน 4 อัน บนพื้นผิวภายในอุโมงค์ลม โดยศึกษาผลของ ระยะห่างระหว่างรอยนูนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิวจาการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะห่างระหว่างรอยนูนแคบลง โดยกรณีที่ระยะ S/D=1.125 ให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีอื่นๆ

 การไหลด้านหลังรอยนูนโดยทั่วไปแล้วจะ เกิดกระแสหมุนวนอยู่กับที่ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดบริเวณที่มี การถ่ายเทความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะห่าง ระหว่างรอยนูนแคบลง บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ ดังกล่าวจะแคบลง ซึ่งจะเกิดจากการรบกวนการไหล ระหว่างกระแสไหลวนที่ไหลผ่านรอยนูนแต่ละอัน ทำให้ การไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การถ่ายเทความ ร้อนบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น

 สำหรับที่เงื่อนไขระยะ S/D=1.125 ปรากฏ บริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำมาก ซึ่งอาจจะเป็นผลมา จากเกิดการไหลแบบแยกตัวจากพื้นผิว ซึ่งจะเกิดขึ้น เฉพาะกรณีระยะห่างระหว่างรอยนูนที่แคบ

### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย นี้ได้ รับทุนส นับสนุนจาก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG590725S

### 9. เอกสารอ้างอิง

[1] มักตาร์ แวหะยี และ ชยุต นันทดุสิต "การทบทวน เอกสาร: การไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มี รอยเว้าและรอยนูน" การถ่ายเทพลังงานความร้อนและ มวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15 วันที่ 30-31 มีนาคม 2559 สุราษฏร์ธานี

[2] S. W. Chang, F. Chiang, T.L. Yang and C.C. Huang, 2008, Heat transfer and pressure drop in dimpled fin channels, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.33, pp.23-40.

[3] P. Li, D. Zhang and Y. Xie, 2014, Heat transfer and flow analysis of  $Al_2O_3$ -water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.73, pp.456–467.

[4] Y. Chen, Y. T. Chew and B.C. Khoo, 2014, Heat transfer and flow structure on periodically dimple–protrusion patterned walls in turbulent channel flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.78, pp.871–882.

[5] W. Siddique, N. A. Khan and I. Haq, 2015, Analysis of numerical results for two-pass trapezoidal channel with different cooling configurations of trailing edge: The effect of dimples, Applied Thermal Engineering, Vol.89, pp.763-771.

[6] Y. Chen, Y. Tian, Chew and B. C. Khoo, 2012, Enhancement of heat transfer in turbulent channel flow over dimpled surface,

# TSF0022



International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.55, pp.8100–8121.

[7] Y. Rao, B. Li and Y. Feng, 2015, Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.61, pp.201–209.

[8] N. Katkhaw, N. Vorayos, T. Kiatsiriroat, Y. Khunatorn, D. Bunturat and A. Nuntaphan, 2014, Heat transfer behavior of flat plate having 45<sup>°</sup> ellipsoidal dimpled surfaces, Case Studies in Thermal Engineering, Vol.2, pp.67–74.

[9] Y. Xie, H. Qu and D. Zhang, 2015, Numerical investigation of flow and heat transfer in rectangular channel with teardrop dimple/protrusion, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.84, pp.486–496.

[10] S. A. Isaev, A. V. Schelchkov, A. I. Leontiev, P. A. Baranov and M. E. Gulcova, 2016, Numerical simulation of the turbulent air flow in the narrow channel with a heated wall and a spherical dimple placed on it for vortex heat transfer enhancement depending on the dimple depth, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.94, pp. 426-448.

[11] S. A. Isaev, N. V. Kornev, A. I. Leontiev and E. Hassel, 2010, Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.94, pp. 426-448.

[11] S. S. Kore, R. J. Yadav, N. K. Sane, 2015, Investigations of Effect of Dimple Depth on Heat Transfer and Fluid Flow within Rectangular Channel, Procedia Engineering, Vol.127, pp. 1110-1117