การพัฒนากลไกสก๊อตโยคเพื่อกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะสำหรับการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน : กรณีศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอก

Development of Scotch Yoke Mechanisms for Generating Pulsating Flows to Enhance Heat Transfer: A Case Study of Sausage Heat Transfer

ชาญณรงค์ วันทา*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Channarong Wantha*

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Hok, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ ชุดกำเนิดคุณลักษณะกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ประยุกต์กับงานการถ่ายเทความร้อน กลไกสก๊อตโยคซึ่งเป็นกลไกที่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมไปสู่การเคลื่อนที่เชิงเส้น ถูกใช้เป็นกลไกหลักในการสร้างกระแสการไหลดังกล่าว กลไกสก๊อตโยคจะบังคับให้กระแสการไหลเข้าแบบเอกรูปกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบคลื่นไซน์ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความไม่เสถียรของการไหล ผลของการประยุกต์การไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว เพื่อการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอก พบว่าอิทธิพลของค่าความถี่ของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะมีนัยสำคัญมากต่อการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอก ที่เลขเรย์โนลดส์ต่ำ และการไหลแบบเป็นจังหวะมีค่าความถี่เหมาะสม อุณหภูมิของไส้กรอกจะเย็นตัวได้เร็วกว่าการไหลคงตัวประมาณ 14.7 % ค่าความถี่ที่เหมาะสมของการไหลแบบเป็นจังหวะพบที่ 2 Hz และแอมพลิจูดที่ 0.35

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน; อาหาร; คลื่นไซน์; ความถี่; การไหลแกว่งกวัด

Abstract

In this paper, the device for generating pulsating flow characteristics was developed for heat-transfer applications. The scotch-yoke mechanism, which is a reciprocating motion mechanism converting a rotational motion into a linear motion was used as the primary mechanism for

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** cwantha@rmutt.ac.th

doi: 10.14456/tstj.2018.15

producing such flows. The scotch-yoke mechanism forces the inlet uniform flow to become a sinusoidal motion, which leads to increased instability in flows. The results of applying unsteady pulsating flows to heat transfer on a sausage show that the influence of pulsating frequency is more significant on heat-transfer enhancement of a sausage. At a low Reynolds number and flow with an optimal pulsating frequency, the temperature of a sausage cools down more than the steady-flow conditions by approximately 14.7 %. The optimal pulsating frequency is found at 2 Hz and an amplitude of 0.35.

Keywords: heat transfer; food; sine wave; frequency; oscillating flow

1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับ (forced convection heat transfer) เป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลเมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวนี้มีความสามารถเหมาะสมกับการถ่ายเทความร้อนของวัตถุหรืออุปกรณ์หลากหลายประเภท ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เกษตร อาหาร เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, h) เป็นปริมาณที่สำคัญสำหรับการเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับกรณีการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่ปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือเลขเรย์โนลดส์ (Reynolds number, Re) โดยที่เลขเรย์โนลดส์ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งมีค่าแรงเฉื่อยของของไหล (inertia force) สูงกว่าค่าแรงหนืดของของไหล (viscous force) ทั้งในกรณีการไหลท่วมผิววัตถุและการไหลภายในช่องขนาน จะให้ผลตอบสนองต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ได้มากกว่าการไหลแบบแลมินาร์ (laminar flow) [1] อย่างไรก็ตาม การทำให้กระแสการไหลหลักเปลี่ยนเป็นกระแสการไหลแบบปั่นป่วนได้นั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องต้นกำลังที่มีประสิทธิภาพและพลังงานสูง ทำให้ความดันลดและเสียงจะเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาเสมอ เช่น การควบคุมอุณหภูมิในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการทำความเย็นโดยใช้พัดลมช่วยในการถ่ายเทความร้อน

การสร้างความไม่เสถียรให้กับการไหล นอกจากอาศัยการเพิ่มค่าแรงเฉื่อยของของไหลแล้ว สามารถกระทำได้โดยการพัฒนาให้กระแสการไหลหลักเป็นคุณลักษณะการไหลแกว่งกวัด (oscillating flow) ซึ่งคุณลักษณะการไหลแกว่งกวัดแบ่งออกได้เป็นการไหลแบบกลับไปกลับมา (reciprocating flow) และการไหลแบบเป็นจังหวะ (pulsating flow) [2] สำหรับการไหลแบบกลับไปกลับมานั้น ทิศทางของกระแสการไหลจะไหลกลับไปกลับมาเป็นคาบเวลาคงที่ค่าหนึ่ง ในขณะที่การไหลแบบเป็นจังหวะทิศทางของกระแสการไหลจะไม่ไหลย้อนกลับ โดยการเคลื่อนที่ของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะจะกำหนดในรูปสมการ $U_i = U_o(1 + A\sin 2\pi ft)$ เมื่อ A และ f คือ ค่าแอมพลิจูดและค่าความถี่ของการไหลตามลำดับ [3,4] ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้สามารถควบคุมและสร้างให้การไหลแบบเอกรูป (uniform flow) เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลที่เสียเสถียรภาพตามค่าความถี่และแอมพลิจูดที่กำหนดได้ง่ายขึ้น Kim และคณะ [3] ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในโดเมน 2 มิติ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัตถุร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 ชิ้น ภายใต้

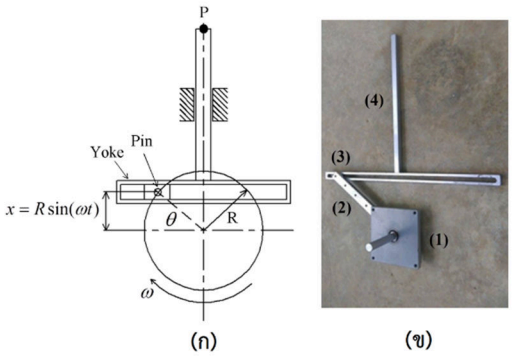
กระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการไหลแบบเป็นจังหวะได้สร้างความไม่เสถียรให้กับการไหลและค่าแอมพลิจูดเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน เช่นเดียวกับงานของ Suksangpanomrung และคณะ [4] ที่พบว่าการไหลแบบเป็นจังหวะที่เลขเรย์โนลดส์ต่ำ ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของการไหลมีผลทำให้การไหลคงตัว (steady flow) เปลี่ยนไปสู่การไหลแบบไม่คงตัว (unsteady flow) และพบการแตกตัวของวอร์เทกซ์บริเวณผิวของวัตถุ Moon และคณะ [5] และ Ji และคณะ [6] ได้ออกแบบชุดทดลองการไหลแบบเป็นจังหวะเพื่อใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัตถุร้อน ชุดทดลองมีอุปกรณ์หลัก ซึ่งประกอบด้วยลำโพง เครื่องกำเนิดความถี่ (function generator) และเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) Akdag และคณะ [7] ประยุกต์การไหลแบบเป็นจังหวะร่วมกับของไหลนาโน (nanofluid) เพื่อส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนให้กับช่องขนานผิวคลื่นขนาดเล็ก ผลของการจำลองเชิงตัวเลขชี้ให้เห็นว่าของไหลนาโนเมื่อใช้ร่วมกับกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่มีค่าแอม-พลิจูดเหมาะสม นำไปสู่ผลการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าการไหลคงตัว Wantha [8] ศึกษาเชิงทดลองและพัฒนาสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ (fin and tube heat exchanger) ภายใต้กระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว ซึ่งพบว่ามันสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ 31.7 % เมื่อเทียบกับการไหลคงตัว Mikheev และคณะ [9] ได้ใช้เครื่อง Pulsator เพื่อทำให้เกิดการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวเพื่อการถ่ายเทความร้อนบนท่อทรงกระบอกโดยอัตราการไหลถูกปรับโดยชัตเตอร์(shutter) ส่วนความถี่ของการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุปกรณ์ที่เรียกว่าแฟลป (flap)

แม้ว่ากระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวมีศักยภาพมากเพียงพอที่จะนำไปใช้ แต่กลับพบว่ายังไม่ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับงานด้านถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาหนึ่ง คือ การขาดชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่มีประสิทธิภาพ การใช้ลำโพง เครื่องกำเนิดความถี่และเครื่องขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับชุดทดลองดังกล่าวข้างต้นจะมีปัญหาและมีความยุ่งยากในทางปฏิบัติ ลำโพงมีอายุการใช้งานจำกัดและมีประสิทธิภาพต่ำในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ทำให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นซึ่งสำคัญต่อการไหลแบบเป็นจังหวะอยู่ในขอบเขตจำกัด ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดกำเนิดกระแสการไหลแกว่งกวัดชนิดการไหลแบบเป็นจังหวะขึ้นใหม่ โดยได้นำกลไกสก๊อตโยค (Scotch Yoke mechanism) ซึ่งเป็นกลไกชนิดเคลื่อนที่กลับไปกลับมาสี่ชิ้นต่อโยงมาประยุกต์ใช้ ไส้กรอกเนื้อหมูที่ถูกทำให้ร้อนถูกเลือกเป็นวัสดุทดสอบภายใต้อิทธิพลของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่สร้างจากกลไกดังกล่าว สำหรับผลการวิจัยที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาให้เกิดชุดอุปกรณ์กำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงและสามารถนำไปประยุกต์กับการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนในปัญหาอื่น ๆ ได้

2. การออกแบบกลไกสก๊อตโยค

กลไกสก๊อตโยคดังแสดงในรูปที่ 1ก เป็นกลไกที่มีลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมไปสู่การเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ โดยที่จุด P ที่อยู่บน Yoke จะแกว่งกวัดขึ้นและลงตามค่าความเร็วเชิงมุม (ω) คงที่ค่าหนึ่ง โดยมีแบริ่ง (bearing) บังคับทิศทางไว้ ทำให้จุด P เมื่อเทียบกับเวลาจะเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเชิงเดียว (simple harmonic motion) หรือคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีค่าแอมพิจูด

R และความถี่ f คงที่ นั่นคือ กลไกสก๊อตโยคสามารถทำให้อากาศที่อยู่บริเวณจุด P แกว่งกวัดเป็นคลื่นไซน์ได้ ซึ่งมันจะสอดคล้องกับคุณลักษณะการไหลแกว่งกวัดชนิดการไหลแบบเป็นจังหวะ ซึ่งต้องทำให้กระแสการไหลของของไหลมีรูปแบบเป็นคลื่นไซน์ก่อนเข้าถ่ายเทความร้อนจากวัตถุ ดังนั้นเองกลไกสก๊อตโยคจึงมีความน่าจะเป็นที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ สำหรับสมการการกระจัด(displacement) สมการความเร็วและความเร่งของกลไกสก๊อตโยคกำหนดเป็น [10, 11]



รูปที่ 1 แผนภาพและภาพถ่ายกลไก Scotch Yoke ที่ใช้ในการศึกษา

สมการการกระจัด

$$x = R\sin(\omega t) \quad (1)$$

สมการความเร็ว

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega R\cos(\omega t) \quad (2)$$

สมการความเร่ง

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 R\sin(\omega t) \quad (3)$$

ในรูปที่ 1ข แสดงกลไกสก๊อตโยคที่ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่เพื่อใช้เป็นชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ กลไกสก๊อตโยคสร้างจากวัสดุเหล็กกล้า โดยมีรายละเอียดสำคัญ คือ ชิ้นต่อโยง (linkage) หมายเลข 2 หรือข้อเหวี่ยง (crank) มีความยาวรวมทั้งหมด 0.13 เมตร ข้อเหวี่ยงที่ออกแบบนี้สามารถปรับระยะ R เพื่อให้สอดคล้องกับค่าการกระจัดที่ต้องการได้ ชิ้นต่อโยงหมายเลข 3 หรือ Yoke มีขนาดความยาว 0.57 เมตร และชิ้นต่อโยงหมายเลข 4 หรือ slider มีขนาดความยาว 0.41 เมตร ที่ปลายของชิ้นต่อโยงหมายเลข 4 (จุด P) ได้ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.290 เมตร หนา 0.003 เมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนเป็นลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ทำให้กระแสอากาศที่กำลังเคลื่อนที่เพื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดการพัฒนาเป็นกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว

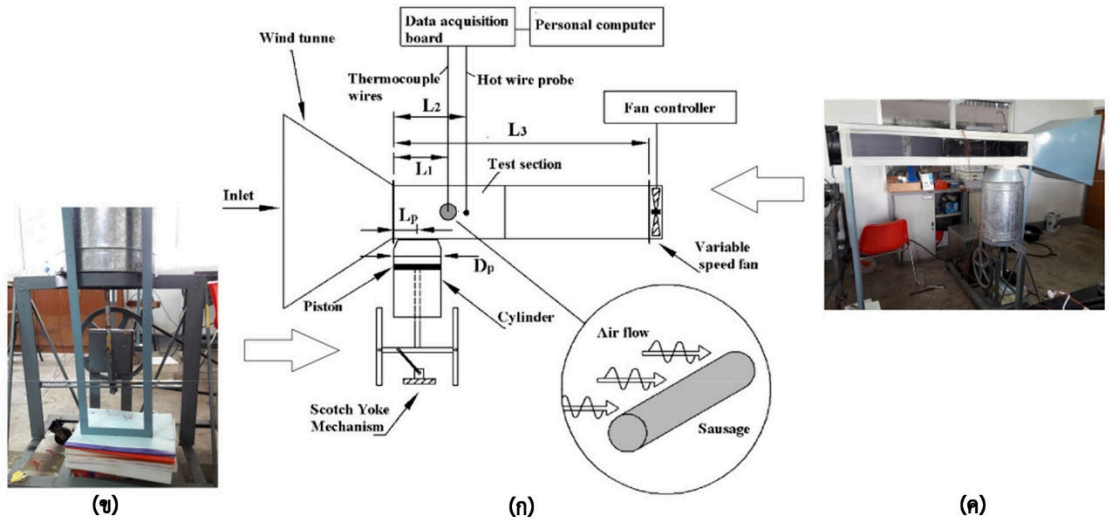
3. ชุดทดลองและวิธีการ

รูปที่ 2ก แสดงแผนภาพของชุดทดลองโดยมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

3.1 ชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ ซึ่งประกอบด้วยกลไกสก๊อตโยคและท่อโลหะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_p) 0.3 เมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นกระบอกสูบโดยที่ปลายท่อทรงกระบอกนี้ถูกเชื่อมติดกับท่อรูปทรงกรวยปลายตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.21 เมตร เพื่อบังคับทิศทางการไหลและเพิ่มความเร็วของอากาศ ซึ่งมีระยะติดตั้งที่ L_p เท่ากับ 0.105 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2ก และ 2ข ชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ขนาด 746 วัตต์ เป็นเครื่องต้นกำลัง ชุดกำเนิดการไหลแกว่งกวัดชนิดการไหลแบบเป็นจังหวะถูกวางด้านล่างของอุโมงค์ลมโดยทำการเชื่อมต่อกันด้วยแผ่นยางเพื่อกั้นไม่ให้มีการไหลแทรกของอากาศเข้าอุโมงค์ลมและเพื่อให้มีความยืดหยุ่นลดการสั่นสะเทือน

3.2 อุโมงค์ลมชนิดการไหลความเร็วต่ำแสดงในรูปที่ 2ก และ 2ค มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.21×0.21

เมตร ความยาว L_3 เท่ากับ 1.2 เมตร ใช้แผ่นโลหะสีดำปิดทับทั้งสี่ด้านโดยแผ่นโลหะแผ่นล่างจะทำการเจาะหนึ่งรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.21 เมตร ที่ระยะ L_p เท่ากับ 0.105 เมตร เพื่อเชื่อมต่อกับท่อรูปทรงกรวยของชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะดังกล่าว ที่ส่วนการทดสอบ (test section) วัดระยะตั้งแต่ทางเข้าของอุโมงค์ลมมีขนาดความยาว 0.58 เมตร ส่วนการทดสอบหนึ่งด้านจะติดตั้งแผ่นพลาสติกใส เพื่อให้สามารถสังเกตและปฏิบัติงานได้ง่ายขึ้น พัดลมไหลตามแนวแกน (axial flow fan) ขนาดพื้นที่หน้าตัดใบพัด 0.16×0.16 เมตร ใช้กระแสไฟฟ้าสลับมีอัตราการไหลสูงสุด 8.07 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที ติดตั้งที่ด้านท้ายของอุโมงค์ลม ส่วนที่ทางเข้าของอากาศได้ทำการติดตั้งแผงรังผึ้ง (honeycomb) ซึ่งทำหน้าที่ลดความปั่นป่วนของอากาศก่อนจะไหลเข้าสู่ส่วนการทดสอบ



รูปที่ 2 (ก) แผนภาพชุดทดลอง (ข) ภาพถ่ายการติดตั้งกลไกสก๊อตโยค และ (ค) ภาพถ่ายชุดทดลอง

วัสดุทดลองเป็นไส้กรอกเนื้อหมูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย(D) เท่ากับ 0.02±0.01 เมตร ยาว 0.1±0.001 เมตร ก่อนดำเนินการวัดค่าการถ่ายเทความร้อน ไส้กรอกจะถูกทำให้ร้อนโดยเครื่องไมโครเวฟ ซึ่งวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางได้ 60±0.5 °C แล้วนำไปตรึงให้อยู่กับที่ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางพื้นที่หน้าตัดของส่วนทดสอบที่ระยะ L_1 เท่ากับ 0.29 เมตร โดยวางในลักษณะขวางทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 2ก สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ T จำนวน 2 เส้นติดตั้งที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกและที่ผิวนอกของไส้กรอกและใช้สายเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 1 เส้น วัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ไส้กรอก

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ประกอบด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ T เครื่องบันทึกอุณหภูมิ NI-4350 USB, TBX-68T (ความแม่น ±0.46 % full scale) และเครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire (ความแม่น ±5 % full scale) ซึ่งหัววัด Hot wire ติดตั้งที่ตำแหน่ง L_2 เท่ากับ 0.31 เมตร ทั้งสองอุปกรณ์จะถูกอ่านค่าและบันทึกลงคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม VI logger สำหรับความเร็วรอบของพัดลมไหลตามแนวแกนถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมความเร็วกระแสสลับ (fan controller) เครื่อง

Digital Tachometer (ความแม่น ±0.05 %) ถูกใช้ในการตรวจวัดความเร็วรอบการทำงานของกลไก ซึ่งผลการทดลองที่จะปรากฏแสดงในผลของค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์สูงสุด (maximum relative uncertainty) ของการวัดอุณหภูมิในการทดลองนี้มีค่า 1.73 %

การทดลองถูกดำเนินไปโดยใช้อากาศที่สภาวะบรรยากาศปกติอุณหภูมิเฉลี่ย 26.5±0.5 °C เป็นของไหลทำงาน อากาศจะถูกพัดลมที่กำหนดความเร็วรอบไว้ส่งเข้าสู่อุโมงค์ลมผ่านชุดแผงรังผึ้ง และเข้าสู่ส่วนทดสอบซึ่งมีไส้กรองร้อนจำนวน 1 ชิ้นที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลสำเร็จแล้วมีอุณหภูมิ 60±0.5 °C ติดตั้งคงที่อยู่ ในการศึกษาเชิงทดลองได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการไหลคงตัวมีคุณลักษณะของกระแสการไหลแบบเอกรูปไม่ขึ้นกับเวลา และกรณีการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว ที่การไหลแบบเป็นจังหวะนี้ชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะจะถูกเปิดใช้งาน ในการทดลองได้กำหนดให้ค่าแอมพลิจูดมีค่าคงที่ ส่วนความเร็วเชิงมุมของกลไกจะถูกปรับเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่ใช้ในศึกษา เมื่อกลไกเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเชิงเดียวอากาศที่บริเวณปลายลูกสูบจะถูกผลักดันเป็นระลอกคลื่นตามจังหวะ ซึ่งประกอบด้วยค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดคงที่ค่าหนึ่งเข้าสู่อุโมงค์ลมที่ระยะ $2L_p$ ซึ่งเป็นขณะเดียวกันกับที่กระแสการไหลของอากาศที่ทางเข้าอุโมงค์ลมกำลังเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่ง $2L_p$ ดังนั้นกระแสการไหลหลักที่มีคุณลักษณะการไหลแบบเอกรูปคงตัวจึงถูกรบกวนและปรับตัวมันเองเป็นการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว ซึ่งสอดคล้องกับสมการการไหลต่อไปนี้ $U_i = U_o(1 + A\sin\omega t)$ และจะเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งเข้าสัมผัสกับไส้กรองร้อนที่ตำแหน่ง L_1 สำหรับตารางที่ 1 แสดงค่าความถี่ ค่าแอมพลิจูดและเลขเรย์โนลดส์ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 ข้อมูลค่าความถี่ ค่าแอมพลิจูด และค่าเลขเรย์โนลดส์ที่ใช้ในการทดลอง

คุณลักษณะการไหล	แอมพลิจูด, A	ความถี่, f (Hz)	เลขเรย์โนลดส์, Re_D
การไหลคงตัว	0	0	236,243,305,452
การไหลแบบเป็นจังหวะ	0.35	1, 2, 3	236

3.1 สมการของการทดลอง

สมการของเลขเรย์โนลดส์, Re_D

$$\mathrm{Re}_D = \frac{U_o D}{\nu} \quad (4)$$

สมการของค่าแอมพลิจูด, A [5]

$$A = \frac{U_p}{U_o} \quad (5)$$

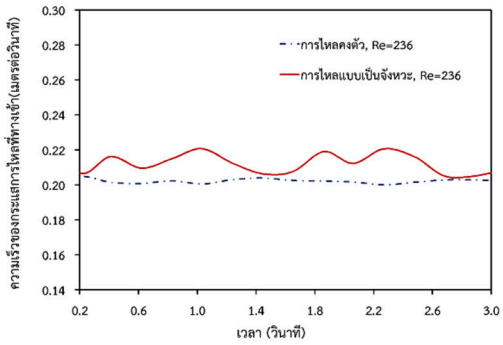
เมื่อ U_o คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยของกระแสการไหล (เมตรต่อวินาที); U_p คือ ค่าความเร็วของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ (เมตรต่อวินาที); D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอก (เมตร); และ ν คือ ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที) ซึ่งหาค่าที่อุณหภูมิฟิลม์ของของไหล

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

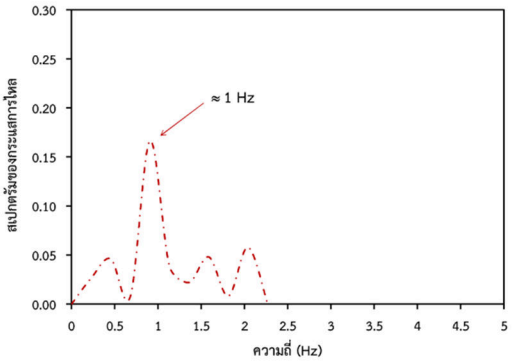
ลำดับแรกของการศึกษา คือ การดำเนินการตรวจสอบความ สามารถในการทำงานได้ของชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่ได้พัฒนาขึ้น โดยข้อเหวี่ยงของกลไกถูกกำหนดให้มีค่า R เท่ากับ 0.03 เมตร สำหรับการตั้งค่าความเร็วรอบของข้อเหวี่ยงเพื่อให้สอดคล้องกับความถี่ (f) ที่ต้องการศึกษาดังที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 นั้น ค่าความเร็วรอบของข้อเหวี่ยงจะหาได้จากผลลัพธ์ของสมการ $\omega = f \times 60$

(รอบต่อนาที) ในขณะที่ค่าการกระจัดและความเร็วของกลไกชิ้นต่อโยงหมายเลข 4 หาได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ เครื่อง Digital Tachometer ได้นำมาใช้การตรวจสอบความเร็วรอบของข้อเหวี่ยงให้สอดคล้องกับผลการออกแบบ รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบการทำงานของชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่ได้พัฒนาขึ้นที่ค่า $\mathrm{Re}_D = 236$ และความถี่ 1 Hz โดยผลการทดลองพบว่าชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่ค่าความถี่ 1 Hz (60 รอบต่อนาที) ที่พัฒนาขึ้นสามารถกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวขึ้นได้ โดยจะทำให้กระแสการไหลแบบเอกรูปคงตัวเปลี่ยน แปลงไปสู่การไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัว กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับคลื่นที่มีค่าแอมพลิจูดและค่าความถี่ของการไหลและทำให้ความเร็วของอากาศแกว่งกวัดเมื่อเทียบกับเวลา ในรูปที่ 4 เป็นผลลัพธ์จากการแปลงความเร็วของการไหลแบบเป็นจังหวะต่อเวลาให้อยู่ในโดเมนของความถี่ ซึ่งพบว่ากระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวที่ $\mathrm{Re}_D = 236$ จะมีค่าความถี่ของการไหลโดดเด่นที่ 1 Hz ซึ่งสอดคล้องตรงกับค่าความถี่ที่ได้ตั้งไว้ให้กับกลไกทำงาน จากผลการทดสอบนี้จึงสามารถยืนยันได้ว่ากลไกสก๊อตโยคที่ใช้เป็นชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการสร้างกระแสการไหลแกว่งกวัดชนิดการไหลแบบเป็นจังหวะได้

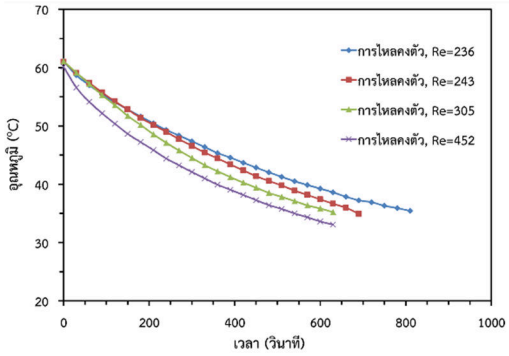
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของการไหลคงตัวที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอก ผลจากการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางไส้กรอกร้อนมีการแปรผันตามค่า Re_D โดยอุณหภูมิที่กึ่งกลางไส้กรอกจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิเริ่มต้นตามค่า Re_D ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่มค่า หมายถึงแรงเฉื่อยของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มความไม่เสถียรของการไหลและกระแสการไหลเข้าหลักถูกปรับเปลี่ยนเป็นการไหลแบบไม่คงตัว มักเกิดวอร์เทกซ์ (vortex) ขึ้น



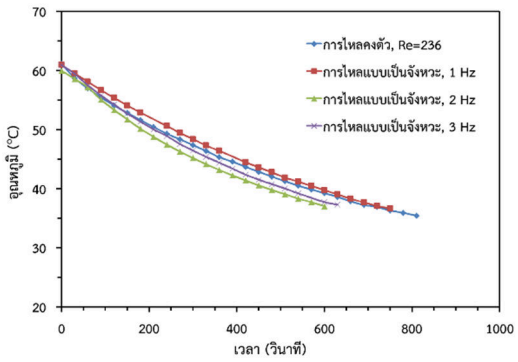
รูปที่ 3 การไหลคงตัวและการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวที่ $\mathrm{Re}_D = 236$



รูปที่ 4 ค่าสเปกตรัมของกระแสการไหลกับค่าความถี่ที่ $\mathrm{Re}_D = 236$



รูปที่ 5 อุณหภูมิที่กึ่งกลางไส้กรอกกับเวลากรณีการไหลคงตัว



รูปที่ 6 อุณหภูมิที่กึ่งกลางไส้กรอกกับเวลากรณีการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวที่ $\mathrm{Re}_D = 236$

ที่ผิว ทำให้มีการพาความร้อนที่ผิวไส้กรอกสูงขึ้นและอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางมีค่าลดลงจากจุดเริ่มต้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งที่ $\mathrm{Re}_D = 452$ อุณหภูมิไส้กรอกจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ $\mathrm{Re}_D = 236$ ประมาณ 15 %

สำหรับผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอกภายใต้กระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ ซึ่งได้กำหนดค่าความถี่ในการทดลองเป็น 1, 2 และ 3 Hz โดยมีค่า $\mathrm{Re}_D = 236$ และ $A = 0.35$ ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อกระแสการไหลคงตัวที่เลขเรย์โนลดส์ต่ำถูกปรับเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวด้วยชุดกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของไส้กรอกได้แปรผันตามค่าความถี่ของกระแสการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่ค่า $\mathrm{Re}_D = 236$ ค่าความถี่ 2 และ 3 Hz ที่เวลา 600 วินาที อุณหภูมิของไส้กรอกมีค่าลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 39 และ 37 % ตามลำดับ ในขณะที่การไหลแบบคงตัวสามารถลดอุณหภูมิของไส้กรอกที่เวลาเดียวกันลงได้เพียง 34 % ทั้งนี้เนื่องจากคุณลักษณะการไหลแบบเป็นจังหวะนั้นจะทำให้เกิดความไม่เสถียรของการไหลได้ง่ายขึ้น กล่าวคือ อนุภาคของของไหลกลายเป็นไม่มีระเบียบมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลและมักเกิดการแตกตัวของวอร์เทกซ์บริเวณผิวของวัตถุและเคลื่อนตัวนำความร้อนผ่านชั้นของไหลผสมกับของไหลเย็นได้มากกว่า ซึ่งนำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในไส้กรอก แม้เป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ดังพบในผลการทดลองในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตาม การไหลแบบเป็นจังหวะจำเป็นต้องมีค่าความถี่ของการไหลที่เหมาะสม จึงจะสามารถส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้ ดังพบในการทดลองที่ค่าความถี่ 1 Hz ซึ่งเมื่อเทียบกับการไหลคงตัวพบว่าความถี่ต่ำ 1 Hz ไม่มีนัยสำคัญต่อการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอก ซึ่งอาจมาจากสาเหตุของค่าความถี่ของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะที่ 1 Hz ไม่ได้ตกอยู่ในขอบเขตของค่า lock-on นั้นคือค่าความถี่ 1 Hz ของกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่ได้มีค่าเป็น 2 เท่า ของค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ที่เกิดจากการไหลคงตัวผ่านวัตถุ [6] และอีกสาเหตุหนึ่งค่าความถี่ของการไหลแบบเป็นจังหวะ 1 Hz ไม่สอดคล้องกับขนาดของไส้กรอกตามทิศทางการไหลทำให้ลดการสั่นที่ชั้นชิดผิวของไส้กรอก [8] สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนกลไกเพื่อกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะการวิเคราะห์พบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งเป็นไปตามจำนวนรอบการทำงาน นั่นคือที่แรงบิดสูงสุดของกลไก Scotch Yoke พบที่มุมของข้อเหวี่ยง 180 องศา และที่ภาระของกลไกสก๊อตโยคพบที่มุมของข้อเหวี่ยง 180 องศา และภาระของกลไกซึ่งมีเพียงแรงดันอากาศจากผลของการคำนวณได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับกลไกเพื่อสร้างแอมพลิจูดที่ 0.35 และความถี่การไหลที่ 2 Hz มีค่าประมาณ 4.12 วัตต์

5. สรุปผล

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอกภายใต้อิทธิพลของกระแสการไหลแกว่ง

กวัดชนิดการไหลแบบเป็นจังหวะ โดยกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะได้ถูกสร้างมาจากการทำงานของกลไกสก๊อตโยค ซึ่งผลการประยุกต์ใช้กลไกสก๊อตโยค เพื่อกำเนิดกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะ พบว่ากลไกสก๊อตโยคสามารถสร้างกระแสการไหลแบบเป็นจังหวะตามค่าความถี่และแอมพลิจูดที่กำหนดได้ ซึ่งเมื่อนำคุณลักษณะการไหลแบบเป็นจังหวะไปใช้กับการถ่ายเทความร้อนกับไส้กรอก ผลการทดลองพบว่ากระแสการไหลแบบเป็นจังหวะไม่คงตัวแม้มีเลขเรย์โนลดส์ต่ำ ก็ยังมีความสามารถลดอุณหภูมิของไส้กรอกลงได้รวดเร็วกว่าการไหลแบบคงตัวที่ต้องอาศัยการเพิ่มเลขเรย์โนลดส์เพื่อสร้างความไม่เสถียรให้กับของไหลที่ประมาณ 14.7 % แต่อย่างไรก็ตามการไหลแบบเป็นจังหวะจำเป็นต้องมีค่าความถี่ที่เหมาะสมต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย นอกจากนี้เพื่อให้ทราบถึงกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนไส้กรอกได้กระจ่างขึ้น ควรพิจารณาเลือกศึกษาเพิ่มเติมโดยการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย

7. รายการอ้างอิง

[1] Velayati, E. and Yaghoubi, M., 2005, Numerical study of convective heat transfer from an array of parallel bluff plates, Int. J. Heat Fluid Flow 26: 80-91.

[2] Nsofor, E.C., Celik, S. and Wang, X., 2007, Experimental study on the heat transfer at the heat exchanger of the thermo-acoustic refrigerating system, Appl. Thermal Eng. 27: 2435-2442.

[3] Kim, S.Y., Kang, B.H. and Hyun, J.M., 1998, Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow, Int. J. Heat Mass Transfer 41: 625-634.

[4] Suksangpanomrung, A., Chungpaibulpatana, S. and Promvonge, P., 2007, Numerical investigation of heat transfer in pulsating flows through a bluff plate, Int. Commun. Heat Mass Transfer. 34: 829-837.

[5] Moon, J.W., Kim, S.Y. and Cho, H.H., 2005, Frequency-dependent heat transfer enhancement from rectangular heated block array in a pulsating channel flow, Int. J. Heat Mass Transfer. 48: 4904-4913.

[6] Ji, T.H., Kim, S.Y. and Hyun, J.M., 2008, Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow, Int. J. Heat Mass Transfer. 51: 1130-1138.

[7] Akdag, U., Akcay, S. and Demiral, D., 2014, Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel, Int. Commun. Heat Mass Transfer. 59: 17-23.

[8] Wantha, C., 2016, Effect and heat transfer correlations of finned tube heat exchanger under unsteady pulsating flows, Int. J. Heat Mass Transfer. 99: 141-148.

[9] Mikheev, N.I., Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N. and Dushina, O.A., 2017, Hydrody-

namics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder, Int. J. Heat Mass Transfer. 109: 254-265.

[10] Mabie, H.H. and Reinholtz, C.F., 1987. Mechanisms and dynamics of machinery, 4th Ed., John Wiley & Sons, New Jersey.

[11] Richards, K.L., 2014. Design Engineer's Reference Guide: Mathematics, Mechanics, and Thermodynamics. CRC Press.