

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ:RSA6280083

ชื่อโครงการ: การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลสองเฟสแบบไมโครสเกลในท่อตรงและท่อขดเกลียว

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน: รศ.ดร.ศิริระ สายสร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

อีเมล:sira.sa@kmitl.ac.th

ระยะเวลาโครงการ:3 ปี

บทคัดย่อ:

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการไหลแบบสองเฟสภายในท่อตรงและท่อขดเกลียวขนาดไมโคร ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 มิลลิเมตร การทดลองเริ่มจากการศึกษาพื้นฐานพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อตรง และต่อด้วยการทดลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อขดเกลียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลางที่มีต่อกลไกการไหลภายในท่อขนาดไมโคร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลที่ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดคือรูปแบบการไหลแบบวงแหวน โดยรูปแบบการไหลดังกล่าวไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลภายในท่อ (ท่อแนวนอน, แนวตั้งไหลขึ้นและแนวตั้งไหลลง) สำหรับผลการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร สมบัติการพาความร้อนภายในท่อขดเกลียวที่ไหลขึ้นในแนวตั้งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับผลการถ่ายเทความร้อนในทิศทางอื่น นอกจากนี้ การสังเกตพฤติกรรมการไหลภายในท่อแกว่งเกลียวขนาดไมโครภายใต้สภาวะอะไดบาติกทำให้ทราบว่ารูปแบบการไหลภายในท่อขดเกลียวสุดท้ายก่อนถึงทางออกมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่พบภายในท่อขดเกลียวอื่น ๆ และการกระจายตัวของทั้งสองเฟสสามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลแบบดริฟฟลักซ์

คำหลัก : การไหลสองเฟส, ท่อขดเกลียว, รูปแบบการไหล, ไมโครแชนเนล

Abstract

Project Code : RSA6280083

Project Title : The comparisons of micro-scale two-phase flow behavior in straight and helical tubes

Investigator : Assoc.Prof.Dr.Sira Saisorn
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prince of Chumphon Campus

E-mail Address : sira.sa@kmitl.ac.th

Project Period : 3 years

Abstract:

This report is the experimental investigation of two-phase flow in straight and helical micro-tubes with diameters of less than 1 mm. The experiment first started with the fundamental of flow and heat transfer behaviors in the straight tube. Subsequently, the flow and heat transfer experiments based on the helical micro-tubes were conducted in order to study the influence of centrifugal force on the flow mechanisms in the micro-tubes. The experimental results indicated annular flow pattern offering the best heat transfer. The annular flow was independent with the channel orientations (horizontal flow, up-flow, and down-flow). For the two-phase flow in the helical micro-tube, the heat transfer coefficient was highest in the up-flow direction. Additionally, two-phase adiabatic flow visualization in a glass helical micro-tube showed that the flow pattern taking place in the last coil before outlet was similar to the other coils, and the drift flux model was able to explain the phase distribution inside the helical micro-tube.

Keywords : two-phase flow, helical tube, flow pattern, micro-channel

1.วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษากลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสองเฟสภายในท่อตรงขนาดไมโคร
- 2 เพื่อศึกษากลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสองเฟสภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร
- 3 นำข้อมูลวิจัยไปยื่นจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์นวัตกรรมทางการแพทย์สำหรับผู้ที่ต้องการประคบร้อนหรือประคบเย็นแบบต่อเนื่อง

2. ความสำคัญและที่มาของปัญหา-ทบทวนวรรณกรรม

ในระยะหลายปีที่ผ่านมา พบว่าอุปกรณ์ทางกลสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลได้มีการลดขนาดลงมาอย่างต่อเนื่อง การลดขนาดช่องทางการไหลโดยใช้ท่อขนาดไมโคร (micro-channel) สามารถแก้ปัญหาเรื่องข้อจำกัดการใช้พื้นที่ในการติดตั้ง สามารถลดน้ำหนักลดราคาของวัสดุและสารทำงาน งานวิจัยในยุคแรก ๆ ที่มีของไหลเฟสเดียว (single-phase flow) ไหลภายในท่อขนาดเล็กถูกรายงานไว้โดย Tuckerman และ Pease (1981) โดยช่องทางการไหลขนาดเล็กสามารถทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นและสามารถทนต่อการไหลภายใต้ความดันสูงได้เมื่อเทียบกับท่อขนาดปกติ ส่วนงานวิจัยในยุคปัจจุบันจะเป็นการไหลสองเฟส (two-phase flow) ภายในท่อขนาดไมโคร ซึ่งพบว่าการลดขนาดของท่อลงมามาก ๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร) จะทำให้กลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนไปจากข้อมูลที่ถูกตีพิมพ์อยู่ในตำราเรียนเกี่ยวกับพื้นฐานกลศาสตร์ของไหลและพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ข้อมูลกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขนาดเล็กสามารถอ่านได้จาก Thome และคณะ (2013), Saisorn และ Wongwises (2012), Kandlikar (2010) ข้อมูลจากงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลงมามาก ๆ จะทำให้แรงตึงผิวมีค่าสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง (threshold value) ซึ่งเป็นผลให้กลไกการไหลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เคยพบเห็นภายในท่อปกติ กลไกการไหลที่แตกต่างกันระหว่างท่อขนาดปกติและท่อขนาดไมโครถูกรายงานไว้โดย Ide และ Kawaji (2013), Chung และ Kawaji (2004), Oh และ คณะ (2011), Ong และ Thome (2011a), Saisorn และคณะ (2013)

Mehendale และ คณะ (2000) เสนอให้เรียกท่อ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ว่าเป็นท่อขนาดไมโคร ส่วน Kandlikar (2002) กำหนดให้ท่อขนาดไมโครคือท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 200 ไมโครเมตร นักวิจัยสองท่านนี้ใช้เกณฑ์ง่าย ๆ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการแบ่งชนิดท่อ ส่วนเกณฑ์อื่น ๆ ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับ คือ เกณฑ์ที่ใช้ตัวแปรไร้มิติในการแบ่งชนิดของท่อ เช่น

Kew และ Cornwell (1997) ได้เสนอแนะให้ใช้คอนไฟเมนต์นัมเบอร์ (confinement number, Co) เป็นตัวจำแนกความแตกต่าง ซึ่งคอนไฟเมนต์นัมเบอร์สามารถถูกแสดงเป็นสมการคือ

$$C_o = \frac{(\sigma / g(\rho_l - \rho_g))^{0.5}}{D_h} \quad (1)$$

เมื่อ D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์, σ คือ แรงตึงผิว, g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, ρ_l คือความหนาแน่นของของเหลว, ρ_g คือความหนาแน่นของแก๊ส โดย Kew และ Cornwell (1997) กำหนดให้พฤติกรรมการไหลขนาดไมโครจะเกิดขึ้นที่คอนไฟเมนต์นัมเบอร์ซึ่งมีค่าเกิน 0.5 มิลลิเมตร ตัวแปรไร้หน่วยอื่นที่นิยมใช้กัน คือ อีออสวอนัมเบอร์ (Eötvös number, Eu) ซึ่งถูกแนะนำโดย Ong และ Thome (2011a)

$$Eu = \frac{Bd}{8} = \frac{(\rho_l - \rho_g)gD_h^2}{8\sigma} \quad (2)$$

เมื่อลดขนาดท่อลงมาจน อีออสวอนัมเบอร์ มีค่าประมาณ 0.2 กลไกการไหลจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปจากผลที่ได้ในท่อปกติ นอกจากนี้ Ong และ Thome (2011a) ยังได้ขยายความคำว่า “ช่องทางขนาดมินิ (mini-channel)” ว่าเป็นคำที่ใช้แทนช่วงการเปลี่ยนผ่านระหว่างท่อปกติและท่อขนาดไมโคร

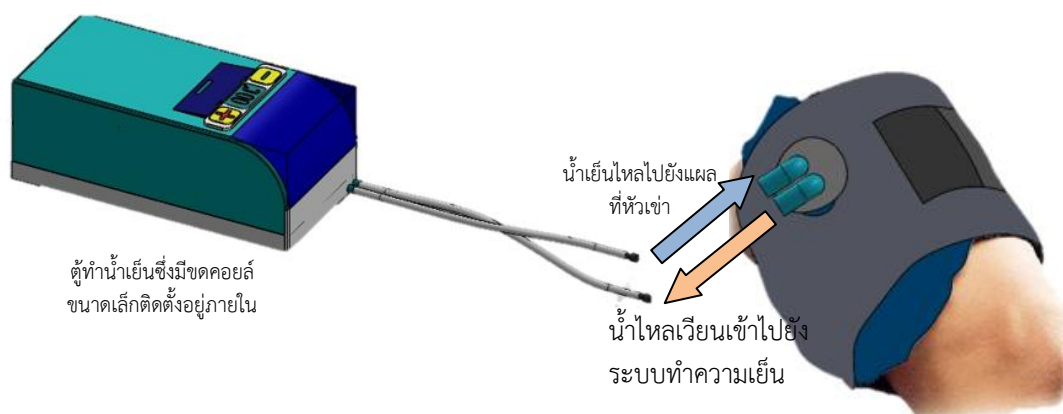
การไหลสองเฟสภายในท่อขนาดไมโครสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบปรับอากาศ, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, เซลล์เชื้อเพลิง, ระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ หรือการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ทางการแพทย์ซึ่งมีราคาแพงมาก เป็นต้น

ในงานนี้จะเน้นไปที่การทําวิจัยและนำข้อมูลการทดลองไปสร้างนวัตกรรมทางการแพทย์สำหรับผู้ป่วยหลังการผ่าตัดรักษาโรคข้อเข่าเสื่อมที่ต้องได้รับการประคบเย็นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายวัน หรือผู้ป่วยที่จำเป็นต้องได้รับการประคบร้อนอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลในปัจจุบันพบว่าโรงพยาบาลขนาดใหญ่ในประเทศไทยนิยมใช้ถุงเจลเพื่อประคบร้อน (โดยนำถุงเจลไปนึ่งให้ร้อนและนำมาประคบ) / ประคบเย็น (โดยนำถุงเจลไปแช่ตู้เย็นและนำมาประคบ) การประคบเย็นโดยใช้อุปกรณ์นี้จะช่วยให้การบาดเจ็บที่เกิดจากการผ่าตัดหายได้เร็วยิ่งขึ้น ถุงเจลมีอุณหภูมิในการใช้งานที่เหมาะสมประมาณ 4 – 55 องศาเซลเซียส ถุงเจลประคบเพื่อรักษาอาการบาดเจ็บหลังการผ่าตัดข้อเข่า (ดังรูปที่ 1) ควรมีการสำรองไว้อย่างน้อย 2 ชั้น โดยสลับกันประคบอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ ในระหว่างที่ชั้นที่หนึ่งนำมาประคบเย็นให้นำชั้นที่สองไปแช่รอไว้ในตู้เย็น เมื่อชั้นแรกไม่สามารถทำความเย็นได้แล้ว จึงนำไปสลับกับชั้นที่สอง กระบวนการดังกล่าวทำให้เจ้าหน้าที่พยาบาลจำเป็นต้องเดินเข้าออกห้องผู้ป่วยเพื่อเปลี่ยนถุงเจลประคบบ่อยๆ



รูปที่ 1 แสดงถุงเจลที่ใช้ในการประคบเย็น

เมื่อผู้ป่วยแข็งแรงขึ้นจนได้รับอนุญาตให้กลับบ้านได้ แพทย์จะแนะนำให้ผู้ป่วยยังคงใช้งานถุงเจลเพื่อประคบเย็นต่อเนื่องอีกเป็นเวลาหลายวันเพื่อลดอาการบวมของแผลผ่าตัด และหากผู้ป่วยเป็นผู้สูงอายุที่ไม่มีใครดูแลก็จะเป็นเรื่องยากลำบากในการลุกมาเปลี่ยนถุงเจลเพื่อทำการประคบอย่างต่อเนื่อง จากประเด็นปัญหาข้างต้น ทั้งในแง่ภาระงานของเจ้าหน้าที่พยาบาลและผู้สูงอายุที่ไม่มีผู้ดูแล จึงมีแนวคิดพัฒนานวัตกรรมการประคบแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2 โดยใช้หลักการเดียวกับตู้จ่ายน้ำดื่มที่เสียบปลั๊กไฟฟ้าและสามารถติดตั้งทั่วไปตามสถานที่ต่าง ๆ คือให้สารทำความเย็นไหลผ่านขดเกลียวเพื่อทำความเย็นให้กับถังเก็บน้ำ แต่ขดเกลียวที่ทำความเย็นให้น้ำจะต้องมีขนาดเล็กมาก (helical micro-tube) เพื่อให้เครื่องประคบแบบต่อเนื่องนี้มีขนาดกระทัดรัดไม่แตกต่างจากถุงเจลประคบเย็นทั่วไปมากนัก ช่วยให้ผู้ป่วยสามารถปล่อยให้เครื่องทำงานต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องใช้เจ้าหน้าที่พยาบาลหรือผู้ดูแล



รูปที่ 2 อุปกรณ์ประคบแบบต่อเนื่อง (ในกรณีประคบเย็น)

การสร้างนวัตกรรมดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขดเกลียวขนาดเล็ก ดังนั้นการวิจัยเรื่องการไหลและการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นขณะเกิดการเดือดภายในท่อขดเกลียวขนาดเล็กจึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการเพื่อทำให้มีความเข้าใจและสามารถออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และมีประสิทธิภาพ หัวข้อถัดไปจะบรรยายถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลสองเฟสภายในท่อขนาดไมโคร

การใช้ของไหลสองเฟสไหลผ่านท่อขนาดไมโครเพื่อวัตถุประสงค์ในการระบายความร้อน ถูกระบุโดย Mudawar (2011) ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สูงมาก มีข้อได้เปรียบคือการได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยใช้ของไหลในปริมาณเพียงเล็กน้อยไหลผ่านในพื้นที่จำกัดได้ การศึกษารูปแบบการไหล, การถ่ายเทความร้อนและความดันลดขณะเกิดการเดือดภายในท่อขนาดไมโครได้ถูกดำเนินการวิจัยและตีพิมพ์เผยแพร่ออกมาดังต่อไปนี้

การศึกษารูปแบบการไหล (flow pattern) ภายในท่อขนาดไมโคร เป็นการวิจัยเพื่อต้องการทราบโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการผสมกันของของเหลวและก๊าซว่ามีรูปทรงลักษณะใด ซึ่งรูปทรงหรือรูปแบบโครงสร้างที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและความดันลด การศึกษาส่วนมากทำโดยการออกแบบระบบถ่ายภาพความเร็วสูงและระบบส่องสว่างซึ่งมีคุณภาพดีทำให้เห็นรายละเอียดโครงสร้างหรือรูปแบบการไหลภายในท่อขนาดเล็กได้อย่างชัดเจน ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปสร้างแผนภูมิหรือแผนที่ซึ่งแสดงการก่อตัวของรูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ ได้ ทำให้วิศวกรสามารถกำหนดเลือกหรือออกแบบอุปกรณ์ให้มีรูปแบบการไหลที่ต้องการได้ ตัวอย่างงานวิจัยด้านนี้ได้แก่ งานของ Arcanjo และคณะ (2010) ที่ศึกษารูปแบบการไหลของสารทำความเย็นภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.32 มิลลิเมตร และพบรูปแบบการไหลต่าง ๆ คือ การไหลเป็นฟอง (bubbly flow), การไหลแบบสลัก (slug flow), การไหลแบบปั่น (churn flow) และการไหลแบบวงแหวน (annular flow) งานของ Saisorn และคณะ (2010) เป็นข้อมูลงานวิจัยในท่อขนาดเล็กลงมากคือ 1.75 มิลลิเมตร และพบรูปแบบการไหลที่แปลกออกไป คือ การไหลแบบคอคอด-วงแหวน (throat-annular flow) และ การไหลแบบวงแหวน-สายน้ำ (annular-rivulet flow) เมื่อท่อมีขนาดเล็กลงเหลือ 1 มิลลิเมตร Saisorn และคณะ (2018) พบว่าโครงสร้างรูปแบบการไหลในท่อแนวตั้งและแนวนอนมีลักษณะแตกต่างกันสำหรับการไหลแบบสลัก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงที่ยังคงมีให้เห็นแม้ว่าแรงตึงผิวจะสูงขึ้นจนเป็น การไหลแบบไมโครเต็มตัวแล้ว (ค่าคอนไฟเมนต์ที่นิมเบอร์เกิน 0.5) Revellin และ Thome (2007), Ong และ Thome (2009) และ Ong และ Thome (2011a) ได้จัดกลุ่มรูปแบบการไหลออกเป็นกลุ่ม ๆ และนำเสนอสหสัมพันธ์เพื่อทำนายรูปแบบการไหลภายในท่อขนาดไมโครได้อย่างแม่นยำ

ข้อมูลงานวิจัยทางด้านกลไกหรือคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลขณะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นก๊าซภายในท่อขนาดไมโคร ถูกนำเสนอออกมาจำนวนมาก Lin และคณะ (2001) ศึกษาการไหลภายในท่อแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร รายงานการพบกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนิวคลีเอท (nucleate boiling) ในช่วงคุณภาพไอมีค่าต่ำ และตรวจพบกลไกการเดือดแบบการพาความร้อน (convective boiling) ในช่วงคุณภาพไอมีค่าสูง งานของ Owahib และคณะ (2004), Huo และคณะ (2004), และ Shiferaw คณะ

(2009) รายงานเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าแปรผันโดยตรงกับฟลักซ์ความร้อน และเมื่อขนาดท่อลดลง จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น Anwar และคณะ (2014) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R-152a ในท่อขนาด 1.6 มิลลิเมตร รายงานว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นอย่างมากเพื่อมี ฟลักซ์ความร้อนถ่ายเทให้กับท่อมากขึ้น Olivaira และคณะ (2016) ใช้สารทำความเย็น R-600a ไหลในท่อแนวนอนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร รายงานว่าฟลักซ์ความร้อนมีผลกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแค่บางช่วงของคุณภาพไอเท่านั้น และจะไม่มีผลเลยเมื่อการไหลมีคุณภาพไอสูง Ong และ Thome (2011b) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น 3 ชนิด (R-245fa, R-134a, R-236fa) ขณะเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นก๊าซ โดยรายงานที่ผลของฟลักซ์ความร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเห็นชัดที่สุดในสารทำความเย็น R-134a เห็นผลรองลงมาคือสารทำความเย็น R-236fa และเห็นผลน้อยที่สุดในสารทำความเย็น R-245fa งานวิจัยส่วนใหญ่จะรายงานว่าพบกลไกการเดือดแบบนิวคลีเอต แต่อย่างไรก็ตามก็มีการศึกษาส่วนหนึ่งที่รายงานว่าพบเฉพาะกลไกการเดือดแบบการพาความร้อน (convective boiling) เท่านั้น โดยประกอบด้วยงานของ Lee และ Lee (2001), Sumith และคณะ (2003), Qu และ Mudawar (2003), Keepaiboon และ Wongwises (2015) และ Thiangtham และคณะ (2016)

ความดันลด (pressure drop) ภายในท่อ เป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เพราะหากความดันลดในระบบท่อมักมาก แสดงว่าต้องใช้ปั๊มหรือคอมเพรสเซอร์ขนาดใหญ่ขึ้นเอง งานวิจัยส่วนใหญ่จึงเป็นการศึกษาหาสภาวะการทำงานที่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสูงสุดแต่ในขณะเดียวกันก็ต้องมีความดันลดในระบบไม่มากเกินไป การศึกษาคุณลักษณะความดันลดภายในท่อขนาดไมโครมีผู้ทำวิจัยและมีรายละเอียดดังนี้ Owhaib และคณะ (2008), Tibirica และคณะ (2011), Maqbool และคณะ (2012), และ Keepaiboon และคณะ (2016) ได้สรุปว่าความดันลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามฟลักซ์มวล นอกจากนี้ Maqbool และคณะ (2012) ได้รายงานว่าความดันลดในท่อแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิอิ่มตัวภายในท่อลงมา Kaew-On และคณะ (2012) และ Keepaiboon และคณะ (2016) ทดลองการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาดไมโคร ที่วางตัวในแนวระดับ ซึ่งได้รายงานข้อมูลสอดคล้องกันเรื่องผลของอุณหภูมิอิ่มตัวที่มีต่อความดันลด

อิทธิพลของการวางตัวของท่อที่มีต่อกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนถูกรายงานโดยนักวิจัยเช่นกัน อาทิ Kandlikar และ Balasubramanian (2005), Zhang และคณะ (2005), Wang และคณะ (2012), Lee และคณะ (2014), และ Gao และคณะ (2017) แต่ผลการวิจัยไม่ไปในทิศทางเดียวกัน อาจมีสาเหตุมาจากแต่ละงานเป็นการทดลองโดยใช้ท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งผลของมุมทั้ง 4 ด้าน (corner effect) จะทำให้มีแรงตึงผิวสูงกว่าส่วนอื่น ๆ ของหน้าตัด และอาจมีส่วนทำให้ข้อมูลในแต่ละงานมีความขัดแย้งกันอยู่ ผลวิจัยล่าสุดรายงานโดย Saisorn และคณะ

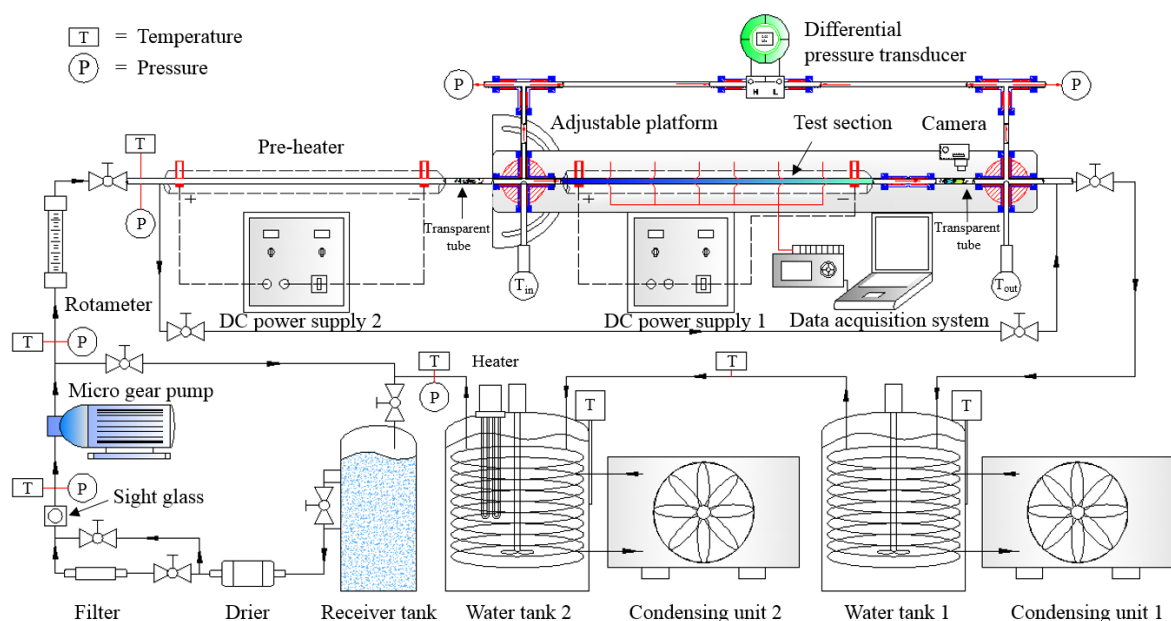
(2018) เป็นข้อมูลการศึกษาในท่อหน้าตัดกลมขนาด 1 มิลลิเมตร (ซึ่งไม่มีผลของมุมมาเกี่ยวข้อง) ได้สรุปว่าการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R-134a ขณะเปลี่ยนแปลงเฟสจากของเหลวไปเป็นก๊าซ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดเมื่อมีการไหลลงในแนวดิ่ง โดยที่ความดันลดไม่เปลี่ยนแปลงไปกับการวางตัวของท่อ

จากการสำรวจเอกสารข้างต้นซึ่งเป็นงานวิจัยทางด้านการไหล การถ่ายเทความร้อน และความดันลดภายในท่อขนาดไมโครพบว่างานทั้งหมดเป็นผลการวิจัยที่ได้จากท่อตรงขนาดไมโคร ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการไหลภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโครจะเป็นแบบเฟสเดียวทั้งหมด (single-phase flow) ในขณะที่การวิจัยเรื่องการไหลสองเฟสภายในท่อขดเกลียวหรือท่อโค้งนั้นจะพบได้เฉพาะท่อขนาดปกติเท่านั้น เช่น งานของ Hardik และ Prabhu (2018), Wongwises และ Polsongkram (2005), Bozzoli และคณะ (2013) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงถือเป็นก้าวแรกในการเปิดประตูเพื่อค้นหาข้อมูลใหม่ ๆ ของการไหลสองเฟสภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลองการไหลขณะเกิดการเดือดของสารทำความเย็นภายในท่อตรงและท่อขดเกลียวขนาดไมโคร

ในการทดลองส่วนนี้จะดำเนินการกับท่อขนาด 1 มิลลิเมตร ซึ่งวางตัวในแนวระดับและแนวดิ่ง แผนผังวงจรการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังวงจรการทดลองสำหรับการไหลสองเฟสภายในท่อตรงขนาดไมโคร

จากรูปที่ 1 ระบบการทำงานจาก Diagram เริ่มจาก Micro gear pump อัตราของเหลวซึ่งเป็นสารทำความเย็น R-134a ผ่าน Rotameter ที่จะดูอัตราการไหลภายในระบบ เมื่อสารทำความเย็นไหลมาถึง Pre-heater จะทำการป้อนกระแสไฟฟ้า DC จาก Power supply ให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะไหลไปยัง ช่วงทดลอง จากนั้นก็ทำการป้อนกระแสไฟฟ้า DC เข้าช่วงทดลอง ในช่วงทดลองนั้น จะเกิดการเดือดของสารทำความเย็นสังเกตได้ที่ทางเข้าและทางออก จะมีท่อโปร่งใสติดตั้งอยู่เพื่อสังเกตดูรูปแบบการไหล และในช่วงเวลานั้นก็เก็บข้อมูลด้วย Data logger บันทึกผลตามอุณหภูมิและเวลาโดยผ่าน Thermocouple type T ในส่วนทางเข้าและทางออกจะวัดค่าความดันลดด้วย Differential pressure transmitter เพื่อเก็บผล สารทำความเย็นที่ออกจาก ช่วงทดลองจะมีอุณหภูมิสูง โดยที่จะนำสารทำความเย็น ที่ออกจากช่วงทดลองมาเข้าขดคอยล์ในถังน้ำ เพื่อที่จะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด ในถังสแตนเลสทั้ง 2 ถังนี้จะมีทั้งคอยล์เย็นและคอยล์ร้อนโดยจะมีใบกวนทำหน้าที่กวนน้ำให้มีอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมดภายในถังน้ำ ส่วนคอยล์เย็นจะทำงานเหมือนเครื่องทำน้ำเย็นโดยใช้เครื่องปรับอากาศ (Inverter) ที่จะมี Sensor เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิในถัง ส่วนอีกถังจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมด้วยเครื่องปรับอากาศ (Inverter) เหมือนกัน ก่อนที่จะมาพักที่ Receiver Tank เพื่อที่จะส่งไปยังปั๊มและเข้าสู่ระบบต่อไป โดยก่อนจะเข้าปั๊มนั้นจะมีตัวกรองเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกเข้าไปอุดตันในระบบ โดยจะมีตัวกรอง 2 ตัวด้วยกัน ตัวแรกเรียกว่า Filter drier เป็นตัวกรองที่มีความละเอียดน้อยหรือกรองหยาบและสามารถดูดความชื้นในระบบได้ ตัวที่สอง เรียกว่า Inline filter ที่มีความละเอียดสูงถึง $7\mu\text{m}$ เอาไว้กรองสิ่งสกปรกก่อนเข้าปั๊มเนื่องจากปั๊มเป็น Micro gear pump รายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ คือ

1. คอมเพรสเซอร์แบบ Inverter และคอนเดนเซอร์ จำนวน 2 ชุด ทำหน้าที่ในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังสแตนเลส เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็น



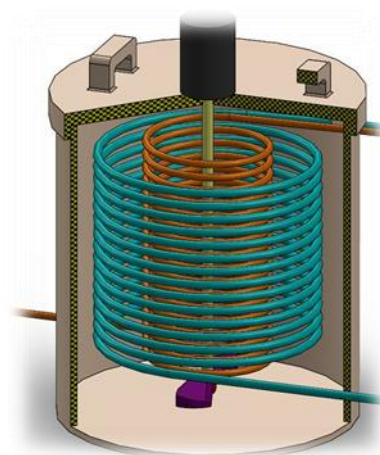
รูปที่ 2 ชุดคอนเดนเซอร์

2. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC) จำนวน 2 เครื่อง หน้าที่ ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับช่วงช่วง Pre-heater และช่วง Test section เพื่อให้สารทำความเย็นเกิดการเดือด



รูปที่ 3 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC)

3. ถังสแตนเลส จำนวน 2 ถัง ขนาดของถังสแตนเลส 40x40 เซนติเมตร ภายในถัง ประกอบไปด้วย ขดคอยล์เย็นไฟฟ้า (Evaporator) ขดคอยล์ร้อนสีส้ม โดยจะมีน้ำเป็นตัวกลาง สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะมีใบพัดกวนน้ำเพื่อกระจายน้ำให้มีอุณหภูมิเท่ากัน



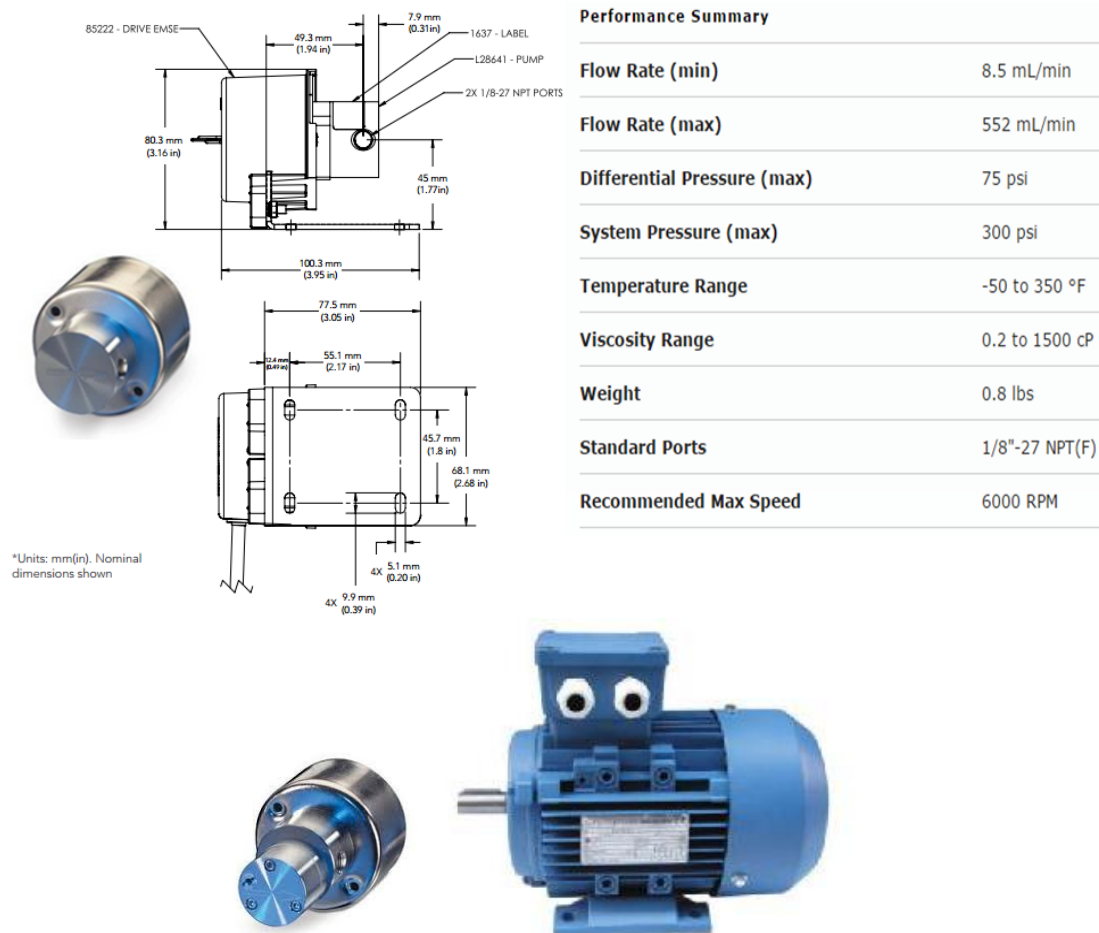
รูปที่ 4 ถังสแตนเลส

4. ถังพักสารทำความเย็น (Receiver tank) ทำหน้าที่พักสารทำงานที่เป็นของเหลว เป็น ถังที่ทนความดันได้สูง



รูปที่ 5 ถึงพัสดุสารทำความเย็น

5. Micro gear pump และ Motor ทำหน้าที่ในการอัดสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 6 Micro gear pump และ Motor

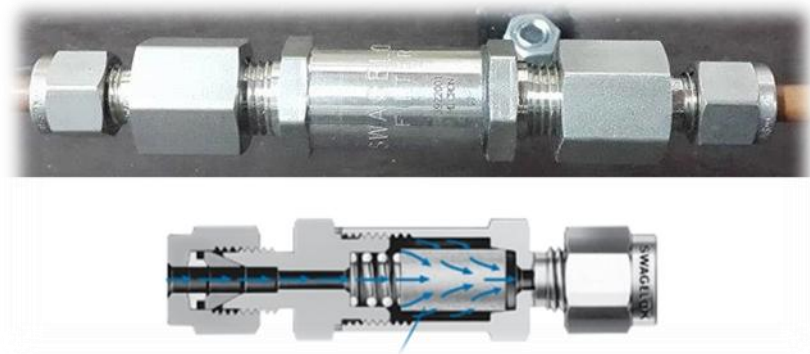
6. ชุดกรอง ประกอบด้วย Filter drier และ Inline filter ทำหน้าที่ ดักจับสิ่งสกปรกและกรองความชื้น ของสารทำความเย็นก่อนที่จะเข้าปั๊ม

6.1 Filter Drier เป็นตัวกรองสารทำความเย็นในระบบซึ่งเปรียบเสมือนกรงหยาด ทำหน้าที่ดักจับความชื้นในสารทำความเย็น



รูปที่ 7 Filter drier

6.2 Inline Filter เป็นตัวกรองสารทำความเย็นในระบบก่อนเข้า Micro Gear Pump เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกก่อนเข้าปั๊มที่จะไม่ให้ ปั๊มเสียหาย ความละเอียดของตัวกรองคือ $7\ \mu\text{m}$



รูปที่ 8 Inline Filter

7. Rotameter ทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลที่ไหลเข้าไปยัง ส่วนในการทดลอง



รูปที่ 9 Rotameter

8. Pre-heater ทำหน้าที่ให้อุณหภูมิแก๊สสารทำงานที่เหมาะสมก่อนเข้าช่วง Test section

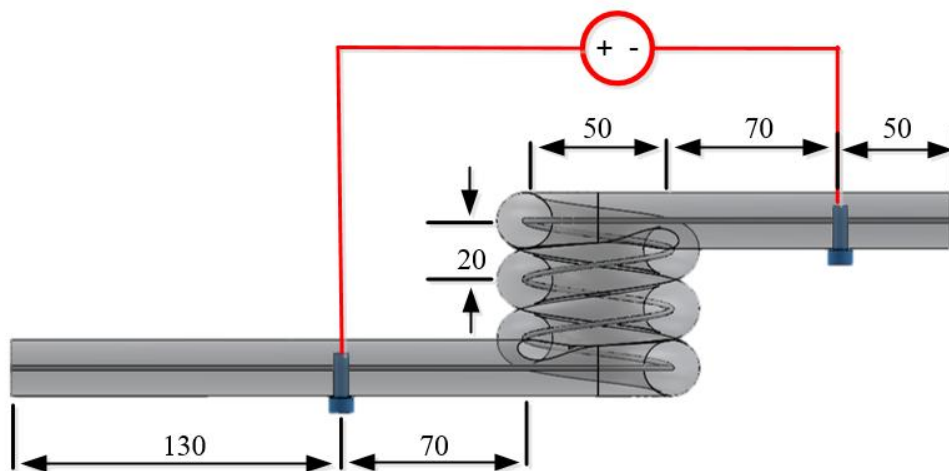


รูปที่ 10 Pre-heater

9. Test section ใช้ศึกษารูปแบบการไหลแล้วทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน วัสดุที่ใช้คือท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร



รูปที่ 11 Test section: straight micro-tube



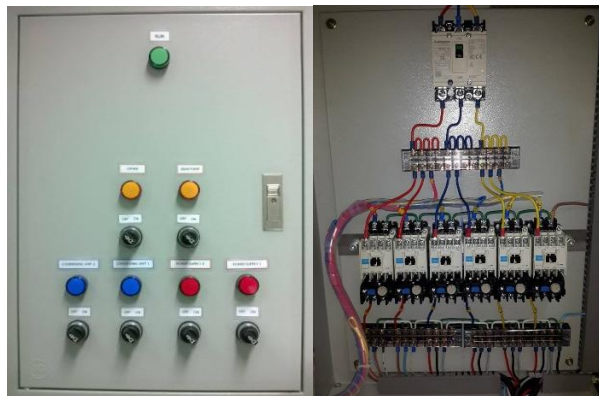
รูปที่ 12 Test section: helical micro-tube

10. ชุดบันทึกข้อมูล Data logger ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลทั้งหมดในระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย



รูปที่ 13 Data logger GL220

11. ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมด ได้แก่ Power supply, Condensing unit (inverter), Micro gear pump, Differential pressure transmitter และ ระบบไฟฟ้าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง โดยมี เมนหลักที่อยู่ในตู้ควบคุม (สามารถดูอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าได้ที่ภาคผนวก)



รูปที่ 14 ตู้ควบคุมระบบไฟ

12. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในระบบ ไว้สำหรับตรวจสอบ

12.1 Pressure gauge ทำหน้าที่ วัดความดันในระบบ



รูปที่ 15 Pressure gauge

12.2 Digital pressure gauge ทำหน้าที่ วัดความดันที่ต้องการรู้ค่าที่แน่นอน



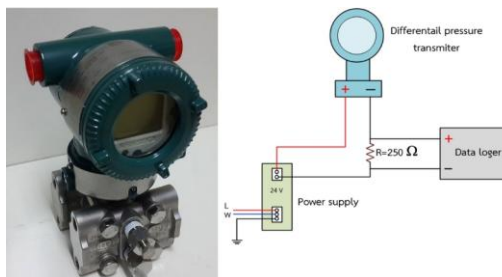
รูปที่ 16 Digital pressure gauge

13. Inverter control pump ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ต่ออยู่กับ micro gear pump



รูปที่ 17 Inverter control pump

14. Differential pressure transmitter ทำหน้าที่วัดความดันที่ตกคร่อม Test section



รูปที่ 18 Differential pressure transmitter

15. LED Lighting ใช้ในการให้ความสว่างขณะทำการดูรูปแบบการไหลและรวมไปถึงขณะการถ่ายภาพการไหลสามารถเพิ่มและลดความสว่างได้



รูปที่ 19 LED Lighting

16. Clamp meter เครื่องมือสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กลับ Test section และ Pre-heater



รูปที่ 20 Clamp meter

17. Digital camera กล้องถ่ายภาพใช้ในการถ่ายภาพการไหล 2 สถานะ เพื่อนำมาศึกษา รูปแบบการไหล โดยใช้กล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงมี Shutter speed ไม่ต่ำกว่า $1/10,000$ s



รูปที่ 21 Digital camera

18. ฉนวน Aeroflex ฉนวน Aerotape คือ ฉนวนชนิดท่อและแผ่นที่ผลิตจากยางอีลาสโตเมอร์ชนิดพิเศษประกอบไปด้วยเซลล์ อีสระซึ่งมีผนังกันไม่ทะลุถึงกันเป็นจำนวนมาก มีน้ำหนักเบา ภายในเซลล์บรรจุด้วยอากาศแห้ง ลักษณะ เช่นนี้ทำให้ฉนวน มีคุณสมบัติเหนือกว่าไฟเบอร์กลาสและฉนวนแบบแข็งอื่นดังนี้

- ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการแทรกซึมของไอน้ำหรือความชื้นจากบรรยากาศต่ำมาก

- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำและคงที่มากตลอดอายุการใช้งาน
- มีความคงทนมากต่อไอโซน, รังสีอัลตราไวโอเลต และสภาวะอากาศต่างๆ
- มีความยืดหยุ่นสูงสามารถโค้งงอไปตามลักษณะท่อได้ง่าย ทำให้ติดตั้งได้รวดเร็วและสวยงาม

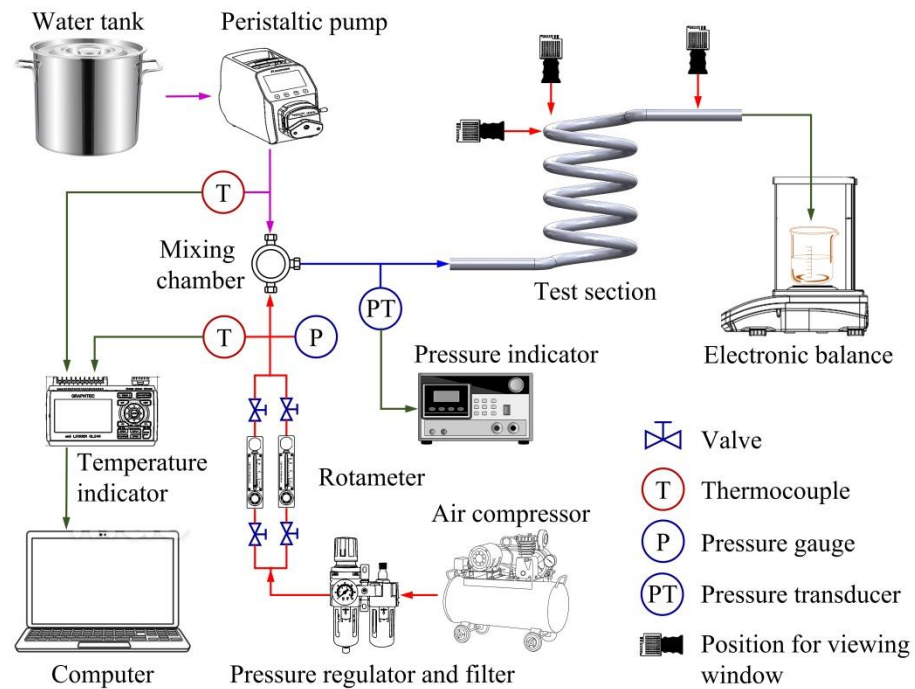
จากคุณสมบัติดังกล่าว Aeroflex จึงเป็นฉนวนที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับหุ้มท่อนำเย็นของเครื่องปรับอากาศแบบศูนย์กลาง (Chilled Water Cooling System) หุ้มท่อก๊าซฟรีย้อนของเครื่องทำความเย็นแบบแยกส่วน (Split Type) และหุ้มท่อก๊าซของเครื่องทำความเย็น (Refrigeration System) ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียความเย็นและป้องกันการเกิดหยดเหงื่อ (Condensation) อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ Aeroflex ยังใช้ลดการสูญเสียความร้อนสำหรับท่อร้อนอย่างได้ผลเช่นกัน



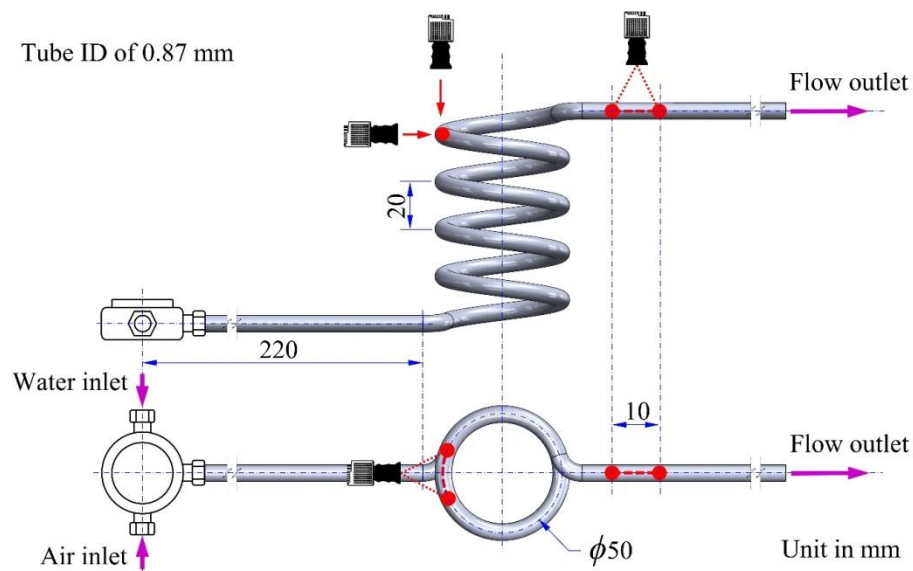
รูปที่ 22 ฉนวน Aeroflex ฉนวน Aerotape

3.2 อุปกรณ์การทดลองการไหลสองเฟสแบบอะไดแบติกภายในท่อแก้วขนาดเกลียวขนาดไมโคร

เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลภายในท่อโค้ง ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ในระบบการเดือด ดังนั้นการทดลองเพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลจึงมีความจำเป็นในการทำความเข้าใจปรากฏการณ์สองเฟสที่มีความซับซ้อนในท่อขนาดเกลียวขนาดไมโคร โดยอุปกรณ์ชุดนี้แสดงในรูปที่ 23 ทำได้โดยต่อระบบแก๊สกับของเหลวให้เข้าไปผสมกันในห้องผสมก่อนไหลเข้าไปยังท่อแก้วแบบขนาดเกลียวขนาดไมโคร ($D = 0.87 \text{ mm}$) ดังแสดงในรูปที่ 24 โรตารีเมเตอร์ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของอากาศจากถังลมก่อนเข้าไปผสมกับน้ำซึ่งถูกขับเคลื่อนโดยเครื่องอัดแบบเพอริสโตลติก (peristaltic pump) อัตราการไหลของน้ำวัดโดยตรงจากเครื่องชั่งละเอียด (electronic balance) ระบบกล้องถูกติดตั้งเพื่อถ่ายภาพรูปแบบการไหลบริเวณส่วนโค้งของท่อทดสอบและที่บริเวณส่วนท่อตรงที่ทางออกของท่อทดสอบ เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบเปิด (ของไหลไหลออกสู่บรรยากาศ) ดังนั้นความดันลดสามารถวัดได้จากค่าความดันที่ทางเข้าของท่อทดสอบซึ่งใช้อุปกรณ์ทรานส์ดิวเซอร์เป็นตัววัดค่าความดัน (pressure transducer)



รูปที่ 23 ชุดอุปกรณ์ทดลองการไหลอะไดแบติกภายในท่อแก้วขดเกลียว

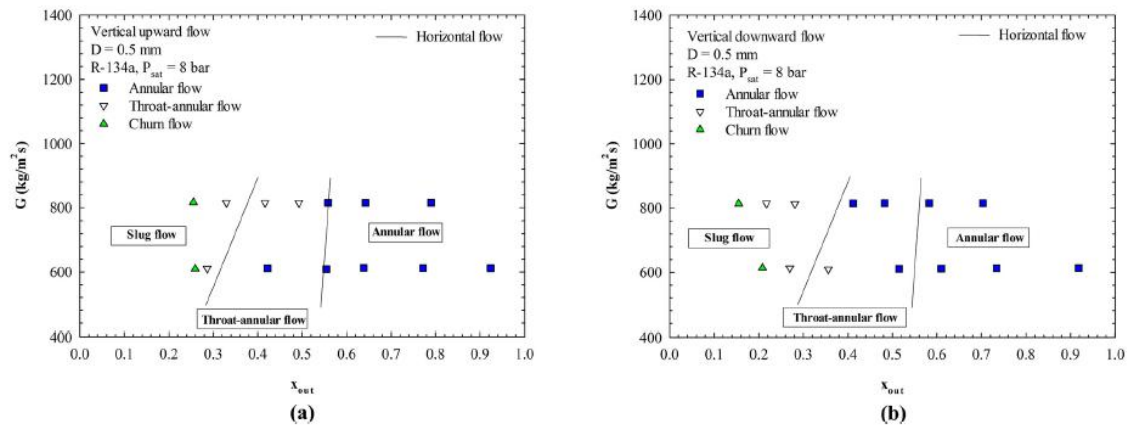


รูปที่ 24 ท่อแก้วขดเกลียวขนาดไมโคร

4. ผลการทดลอง

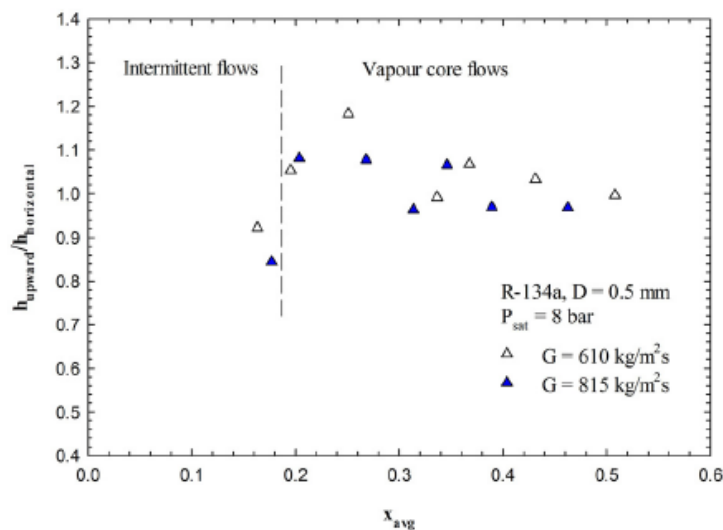
4.1 กลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสองเฟสภายในท่อตรงขนาดไมโคร

อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงส่งผลต่อรูปแบบการไหลแบบกระสุนเท่านั้น ส่วนรูปแบบการไหลแบบวงแหวนมีความเสถียรสูงไม่ได้รับผลจากการจัดวางทิศทางการไหลของท่อ ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 รูปแบบการไหล (a)ทิศทางการไหลขึ้นเทียบกับทิศทางการไหลในแนวระดับ (b)ทิศทางการไหลลงเทียบกับทิศทางการไหลในแนวระดับ

อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยทิศทางการไหลขึ้นและรูปแบบการไหลแบบวงแหวน ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทิศทางการไหลอื่น ดังรูปที่ 26

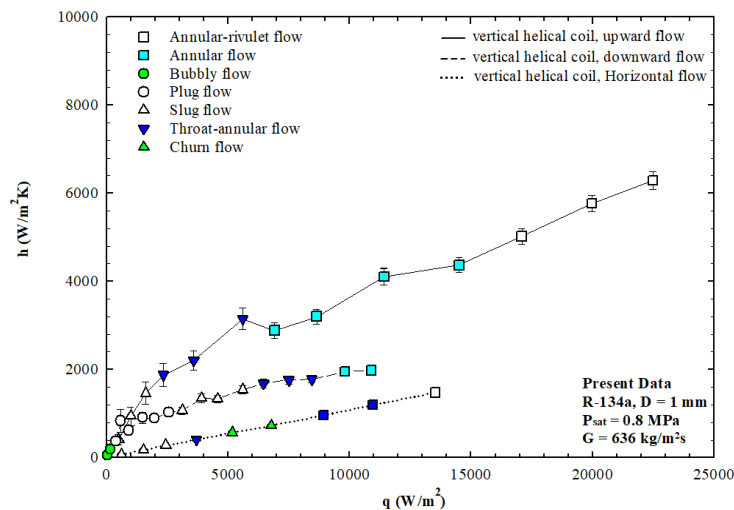


รูปที่ 26 อัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

4.2 กลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสองเฟสภายในท่อขนาดเล็กขนาดไมโคร

ผลการทดลอง ดังรูปที่ 27 พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อขนาดเล็กขนาดไมโครมีค่าสูงสุดเมื่อมีการวางตัวในแนวตั้งและมีการไหลทิศทางการไหลขึ้น ผลการทดลองยังพบว่าขณะที่ฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลมีการเปลี่ยนจาก รูปแบบฟองขนาดเล็ก

และพัฒนาเป็นฟองขนาดใหญ่ขึ้นจนเป็นการไหลแบบวงแหวน เป็นที่สังเกตว่า การถ่ายเทความร้อนไม่มีการลดลงในขณะที่มีการไหลแบบวงแหวน-เส้นน้ำ (Annular-rivulet flow) ที่ฟลักซ์ความร้อนสูง ผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) ที่ถูกขับเคลื่อนโดยแรงสู่ศูนย์กลาง ทำให้ฟิล์มของเหลวยังคงเกาะตัวทั่วบริเวณพื้นผิวภายในท่อและไม่เกิดภาวะพื้นผิวแห้งหรือ Dry-out ซึ่งถือเป็นข้อดีของท่อขดเกลียวในระบบทำความเย็น



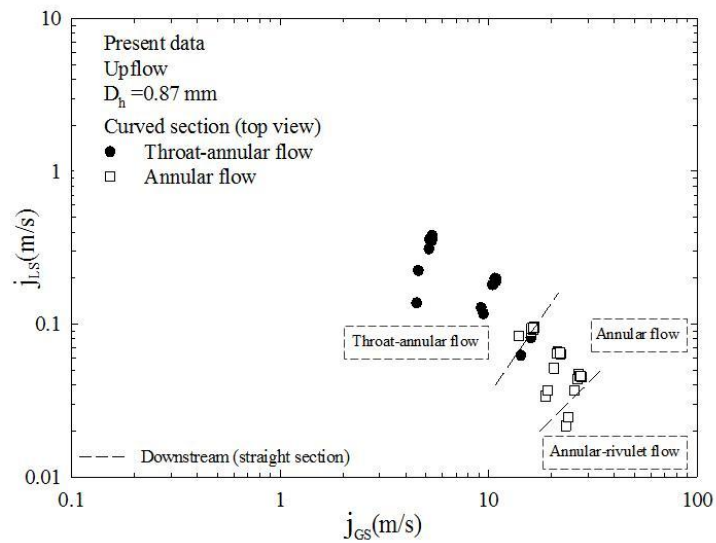
รูปที่ 27 ผลการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโครทิศทางต่าง ๆ

4.3 กลไกการไหลสองเฟสแบบอะไดแบติกภายในท่อแกวชเกลียวขนาดไมโคร

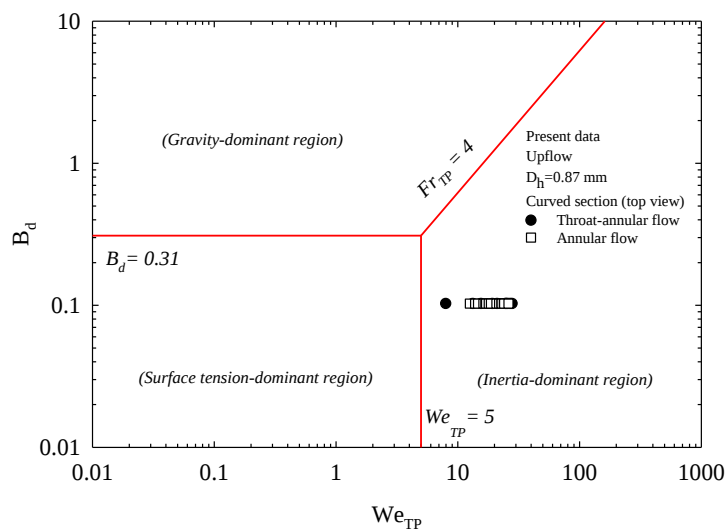
การทดลองการไหลขณะเกิดการเดือดภายในท่อสเตนเลสมีข้อจำกัด คือไม่สามารถมองเห็นกลไกการไหลภายในท่อได้ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของการไหลสองเฟสภายในท่อแกวช จากการค้นข้อมูลพบว่าตำแหน่งที่ยาวเพียงพอในการสังเกตพฤติกรรมของการไหลภายในท่อขดเกลียวคือ ตำแหน่งขดที่ 2 เป็นต้นไป ดังมีการรายงานไว้ใน Kong และคณะ (2017) แต่อย่างไรก็ตาม การสังเกตรูปแบบการไหลในการทดลองนี้ได้ใช้ตำแหน่งขดที่ 4 เนื่องจากเป็นขดบนสุดและไม่มีสิ่งกีดขวาง รูปที่ 28 แสดงแผนภาพรูปแบบการไหลบริเวณส่วนโค้งที่ทางออก เปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลบริเวณท่อตรงที่ต่อจากส่วนโค้ง จากรูปพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนรูปทรงทางออกของท่อ จากท่อโค้งเป็นท่อตรง รูปแบบการไหลที่ทางออกยังคงเดิม ยกเว้นการไหลแบบวงแหวนที่มีการเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบการไหลแบบวงแหวน-เส้นน้ำเมื่อไม่มีอิทธิพลของแรงเหวี่ยงเกิดขึ้นในท่อตรง กลไกการไหลภายในท่อขดเกลียวถูกควบคุมด้วยแรงเฉื่อยภายใต้อิทธิพลของความเร่งสู่ศูนย์กลางซึ่งบ่งชี้จากตัวเลขฟรูดน์เบอร์ (Froude number) ที่มากกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 29

การกระจายตัวของแต่ละเฟสสามารถอธิบายได้โดยดริฟฟลักซ์โมเดล (Drift flux) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแก๊สและความเร็วของผสม ดังแสดงในรูปที่ 30 ข้อมูลการกระจายตัวของเฟสหรือสัดส่วนช่องว่างสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น

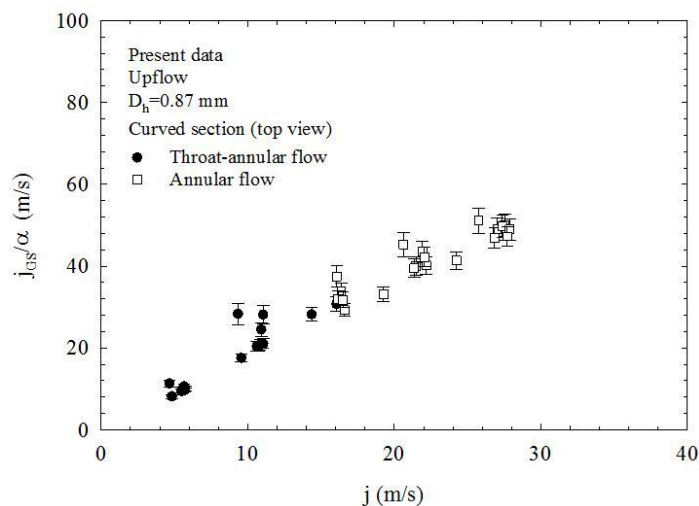
$\alpha = j_{GS}/(1.75j+2.49)$ ซึ่งมีความสำคัญในการคำนวณความดันลดหรือออกแบบอุปกรณ์ที่มีการไหลสองเฟส



รูปที่ 28 แผนภาพรูปแบบการไหลบริเวณส่วนโค้งที่ทางออก เปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลบริเวณท่อตรงที่ต่อจากส่วนโค้ง

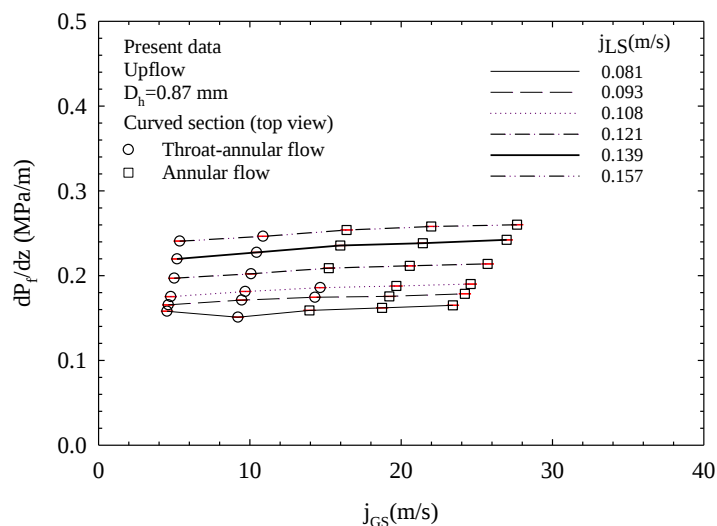


รูปที่ 29 แผนภาพอิทธิพลของแรงต่าง ๆ ภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร



รูปที่ 30 ความเร็วแก๊สและความเร็วของผสมภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร

ความดันลดภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโครจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของเหลว แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบการไหลและความเร็วผิวสัมผัสแก๊ส (Gas superficial velocity) ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 ความดันลดภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร

5. สรุปผล

5.1. รูปแบบการไหลแบบวงแหวนภายในท่อตรงและท่อโค้งขนาดไมโครส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนขณะเกิดการเดือดได้ดีที่สุด

5.2. หากกลไกการไหลถูกควบคุมด้วยแรงเฉื่อย หรือ แรงสู่ศูนย์กลาง จะทำให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์กับระบบการไหลหรือการถ่ายเทความร้อนในสถานีวิภาคได้ เพราะแรงโน้มถ่วงไม่มีผลต่อกลไกการไหลภายในท่อตรงและท่อโค้งขนาดไมโคร

5.3. ทิศทางการไหลไม่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนขณะเกิดการเดือดภายในท่อตรงขนาดไมโคร แต่จะมีผลกระทบต่อการปรากฏการณ์ในท่อโค้งขนาดไมโคร ทั้งนี้การไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) หรือ ดีนวอร์เท็กซ์ (Dean vortex) ที่เกิดในท่อโค้งซึ่งวางในแนวตั้งและไหลขึ้นได้ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

5.4. การกระจายตัวภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโครสามารถอธิบายได้ด้วยดิฟฟลักซ์โมเดล

5.5. รูปแบบการไหลไม่ส่งผลต่อความดันลดภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร

6. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ ผู้เขียนแนะนำให้ทำการวิจัยเพิ่มเติมในท่อโค้งแบบอื่น เช่น ท่อโค้งทรงคลื่น ท่อโค้งแบบเซอร์เพนไทน์ ซึ่งมักใช้ระบายความร้อนให้กับบริเวณที่เข้าถึงยาก เช่น เซลล์แบตเตอรี่ที่จัดเรียงรวมกันจำนวนมาก มอเตอร์ไฟฟ้า รวมไปถึงการสร้างนวัตกรรมชุดระบายความร้อนเพื่อป้องกันโรคลมแดด (Heat stroke)

7. บรรณานุกรม

Anwar, Z., Palm, B., Khodabandeh, R., 2014. "Flow boiling heat transfer and dryout characteristics of R152a in a vertical mini-channel", *Experimental Thermal and Fluid Science* 53, pp. 207-217.

Arcanjo, A.A., Tibiriçá, C.B., Ribatski, G., 2010. "Evaluation of flow patterns and elongated bubble characteristics during the flow boiling of halocarbon refrigerants in a micro-scale channel", *Experimental Thermal and Fluid Science* 34, pp.766-775.

Bozzoli, F., Cattania, L., Rainieri, S., Pagliarini, G., 2014. "Estimation of local heat transfer coefficient in coiled tubes under inverse heat conduction problem approach", *Experimental Thermal and Fluid Science* 59, pp.246-251.

Chung, P.M.Y., Kawaji, M., 2004. "The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels", *International Journal of Multiphase Flow* 30, pp. 735-761.

Gao, W., Xu, X., Liang, X., 2017. "Experimental study on the effect of orientation on flow boiling using R134a in a mini-channel evaporator", *Applied Thermal Engineering* 121, 963-973.

Hardik, B.K., Prabhu, S.V., 2018. "Boiling pressure drop, local heat transfer distribution and critical heat flux in helical coils with R123", *International Journal of Thermal Sciences* 125, 149-165.

Huo, X., Chen, L., Tian, Y.S., Karayiannis, T.G., 2004. "Flow boiling and flow regimes in small diameter tubes", *Applied Thermal Engineering* 24, 1225-1239.

Ide, H., Kawaji, M., 2013. "Effect of tube diameters on the flow phenomena of gas-liquid two-phase flow in microchannels", in: *ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (ICNMM2013)*, Sapporo, Japan, June 16–19, 2013, pp. V001T03A008.

Kaew-On, J., Sakamatapan, K., Wongwises, S., 2012. "Flow boiling pressure drop of R134a in the counter flow multiport minichannel heat exchangers", *Experimental Thermal and Fluid Science* 36, pp.107-117.

Kandlikar, S.G., 2002. "Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, pp.389-407.

Kandlikar, S.G., Balasubramanian, P., 2005. "An Experimental Study on the Effect of Gravitational Orientation on Flow Boiling of Water in $1054 \times 197 \mu\text{m}$ Parallel Minichannels", *Journal of Heat Transfer* 127, pp.820-829.

Kandlikar, S.G., 2010. "Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: a fundamental perspective", *International Journal of Thermal Science* 49, pp.1073-1085.

Keepaiboon, C., Wongwises, S., 2015. "Two-phase flow patterns and heat transfer characteristics of R134a refrigerant during flow boiling in a single rectangular micro-channel", *Experimental Thermal and Fluid Science* 66, pp.36-45.

Keepaiboon C., Thiangtham, P., Mahian, O., Dalkılıç, A.S., Wongwises, S., 2016. "Pressure drop characteristics of R134a during flow boiling in a single rectangular micro-channel", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 71, pp.245-253.

Kew, P.A., Cornwell, K., 1997. "Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels", *Applied Thermal Engineering* 17, pp.705-715.

Kong, L., Gao, X., Li, R., Han, J., 2017. "Bubbles in curved tube flows-An experimental study", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 105, pp.180-188.

Lee, H.J., Lee, S.Y., 2001. "Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios", *International Journal of Multiphase Flow* 27, pp.2043-2062.

Lee, H., Park, I., Mudawar, I., Hasan, M.M., 2014. "Micro-channel evaporator for space applications – 1. Experimental pressure drop and heat transfer results for different orientations in earth gravity", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 77, pp.1213-1230.

Lin, S., Kew, P.A., Cornwell, K., 2001. "Two-phase heat transfer to a refrigerant in a 1 mm diameter tube", *International Journal of Refrigeration* 24, pp.51-56.

Maqbool, M.H., Palm, B., Khodabandeh, R., 2012. "Flow boiling of ammonia in vertical small diameter tubes: Two phase frictional pressure drop results and assessment of prediction methods", *International Journal of Thermal Science* 54, pp.1-12.

Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., Shah, R.K., 2000. "Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design", *Appl. Mech. Rev.* 53, 175-193.

Mudawar, I., 2011. "Two-Phase Microchannel Heat Sinks: Theory, Applications, and Limitations", *Journal of Electronic Packaging* 133, 041002-041002-31.

Oh, J.-T., Pamitran, A.S., Choi, K.-I., Hrnjak, P., 2011. "Experimental investigation on two-phase flow boiling heat transfer of five refrigerants in horizontal small tubes of 0.5, 1.5 and 3.0 mm inner diameters", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, pp.2080-2088.

Oliveira, J. D., Copetti, J. B., Passos, J.C., 2016. "An experimental investigation on flow boiling heat transfer of R-600a in a horizontal small tube", *International Journal of Refrigeration* 72, pp.97-110.

Ong, C.L., Thome, J.R., 2009. "Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a horizontal 1.030 mm circular channel", *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, pp.651-663.

Ong, C.L., Thome, J.R., 2011a. "Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1 – Two-phase flow patterns and film thickness measurements", *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, pp.37-47.

Ong, C.L., Thome, J.R., 2011b. "Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 2 – Flow boiling heat transfer and critical heat flux", *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, pp.873-886.

Owhaib, W., Martín-Callizo, C., Palm, B., 2004. "Evaporative heat transfer in vertical circular microchannels", *Applied Thermal Engineering* 24, pp.1241-1253.

Owhaib, W., Martín-Callizo, C., Palm, B.R., 2008. "Two-phase flow pressure drop of r-134a in a vertical circular mini/micro channel", in: *ASME 2008 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, Darmstadt, Germany, June 23–25, 2008, pp. 343-353.

Qu, W., Mudawar, I., 2003. "Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks—I. Experimental investigation and assessment of correlation methods", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, pp.2755-2771.

Revellin, R., Thome, J.R., 2007. "Experimental investigation of R-134a and R-245fa two-phase flow in microchannels for different flow conditions", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28, pp.63-71.

Saisorn, S., Wongwises S., 2012. "A critical review of recent investigations on flow pattern and heat transfer during flow boiling in micro-channels", *Frontier in Heat and Mass Transfer* 3, 013006.

Saisorn, S., Kaew-On, J., Wongwises, S., 2013. "An experimental investigation of flow boiling heat transfer of R-134a in horizontal and vertical mini-channels", *Experimental Thermal and Fluid Science* 46, pp.232-244.

Saisorn, S., Wongpromma, P., Wongwises, S., 2018. "The difference in flow pattern, heat transfer and pressure drop characteristics of mini-channel flow boiling in horizontal and vertical orientations", *International Journal of Multiphase Flow* 101, pp.97-112.

Shiferaw, D., Karayiannis, T.G., Kenning, D.B.R., 2009. "Flow boiling in a 1.1 mm tube with R134a: Experimental results and comparison with model", *International Journal of Thermal Science* 48, pp.331-341.

Sumith, B., Kaminaga, F., Matsumura, K., 2003. "Saturated flow boiling of water in a vertical small diameter tube", *Experimental Thermal and Fluid Science* 27, pp.789-801.

Thiangtham, P., Keepaiboon, C., Kiatpachai, P., Asirvatham, L.G., Mahian, O., Dalkilic, A.S., Wongwises, S., 2016. "An experimental study on two-phase flow patterns and heat transfer characteristics during boiling of R134a flowing through a multi-microchannel heat sink", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 98, pp.390-400.

Thome, J.R., Bar-Cohen, A., Revellin, R., Zun I., 2013. "Unified mechanistic multiscale mapping of two-phase flow patterns in microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science* 44, pp.1-22.

Tibirica, C.B., Diniz da Silva, J., Ribatski, G., 2011. "Experimental Investigation of Flow Boiling Pressure Drop of R134A in a Microscale Horizontal Smooth Tube", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 3, 011006.

Tuckerman, D.B., Pease, R.F.W., 1981. "High-performance heat sinking for VLSI", *IEEE Electron Device Lett.* 2, pp.126-129.

Wang, C.-C., Chang, W.-J., Dai, C.-H., Lin, Y.-T., Yang, K.-S., 2012. "Effect of inclination on the convective boiling performance of a microchannel heat sink using HFE-7100", *Experimental Thermal and Fluid Science* 36, pp.143-148.

Wongwises, S., Polsongkram, M., 2005. "Evaporation heat transfer and pressure drop of HFC-134a in a helically coiled concentric tube-in-tube heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, pp.658-670.

Zhang, H.Y., Pinjala, D., Wong, T.N., 2005. "Experimental characterization of flow boiling heat dissipation in a microchannel heat sink with different orientations", in: *IEEE-Electronic Packaging Technology Conference*, pp. 670-676.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

-บทความวิจัย ที่ตีพิมพ์ในวารสาร ต่างประเทศและในประเทศ

- 1) Saisorn S, Benjawun P, Suriyawong A, Asirvatham L.G., Mondal P.K., Wongwises S, (2023), "Two-phase flow structures in a helically coiled microchannel: An experimental investigation", Physics of Fluids 35, 102012.
- 2) Saisorn S, Suriyawong A, Srithumkhant P, Wongpromma P, Wongwises S, (2021), "An investigation of horizontal and vertical flow boiling in a single channel with a confinement number beyond the threshold of micro-scale flow", Physics of Fluids 33, 113302.

-บทความวิจัย ที่นำเสนอในระดับนานาชาติ และอยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS

- 1) Suriyawong A., Pratuyai K., Wongwises S., Saisorn S. (2021), "An experimental study of adiabatic two-phase gas-liquid flow in helical micro-tube", AIP Conference Proceedings, 2021, 2397, 030007

-การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

มีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ โดยนำข้อมูลงานวิจัยไปพัฒนาการเรียนการสอน นักศึกษาในระดับปริญญาตรี โทและเอก อีกทั้งนำข้อมูลไปสร้างนวัตกรรมทางการแพทย์และ ยีนจดสิทธิบัตร

-อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

ยีนจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ "อุปกรณ์ประคบร้อน-ประคบเย็นแบบ Portable microfluidic helical-coil-cooler" เลขที่คำขอ 2101005291