บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ท่อความร้อนคืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งระบายความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความร้อนสัมผัสของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อความร้อน ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะสูงและเป็นที่นิยมในงานทางวิศวกรรม เช่น การใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องดึงความร้อนกลับ การระบายความร้อนเฉพาะจุดและการระบายความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ท่อความร้อนชนิดใหม่หรือท่อความร้อนแบบสั่น สร้างจากท่อคาปิลลารีที่ดัดโค้งงอไปมา เมื่อเติมสารทำงานที่เข้าไปในท่อความร้อน สารทำงานจะก่อตัวในรูปของแท่งของเหลว (Slugs) และฟองไอ (Vapor bubbles) การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นของสารทำงานที่เกิดขึ้นด้วยการกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self – excited oscillation) จากการเดือดและการกลั่นตัวของสารทำงาน ข้อดีของท่อความร้อนแบบสั่นคือ สร้างขึ้นได้โดยง่าย สมรรถนะทางความร้อนสูง รวดเร็วต่อการตอบสนองทางความร้อน สามารถทำงานได้ที่ผลต่างอุณหภูมิต่ำ และทำงานได้ในหลายๆ ตำแหน่ง ท่อความร้อนแบบสั่นนั้นแบ่งเป็น 3 แบบ นั่นคือ ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end pulsating heat pipe หรือ CEPHP) ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ (Closed-loop pulsating heat pipe หรือ CLPHP) และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (Closed-loop pulsating heat pipe with check valve หรือ CLPHP/CV) ซึ่งลักษณะการทำงานของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นแต่ละชนิดมีลักษณะการสั่นและการไหลเวียนแตกต่างกันไป โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับจะมีการไหลเวียนของสารทำงานไปในทิศทางเดียวทำให้การส่งถ่ายความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นมีความต่อเนื่องจึงมีสมรรถนะทางความร้อนที่ดีกว่าท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดและท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สารทำงานภายในมีการไหลกลับไปกลับมาระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น แต่การสร้างท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับนั้นมีความยุ่งยากทั้งในการสร้างวาล์วกันกลับและการประกอบวาล์วกันกลับเข้าไปในท่อความร้อน ทำให้มีแนวความคิดที่จะปรับปรุงโครงสร้างของท่อความร้อนใหม่ให้สารทำงานไหลเวียนในทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง ด้วยการสร้างท่อความร้อนแบบสั่นจากท่อคาปิลารี่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ (Closed-loop pulsating heat pipe with non-uniform diameter หรือ CLPHP/NUD) เพื่อใช้บังคับให้เกิด

การไหลเวียนของสารทำงานไปในทิศทางเดียวและมีสมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้นเช่นเดียวกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงโครงสร้างท่อความร้อนแบบสั่นให้ส่งถ่ายความร้อนได้สูงขึ้นโดยมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ ทราบโครงสร้างเรขาคณิตที่เหมาะสม เกิดความเข้าใจอันดีในพฤติกรรมการไหลและความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาเพื่อหาแนวทางปรับปรุงโครงสร้างท่อความร้อนแบบสั่นให้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงขึ้นและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ทดลองหาโครงสร้างที่เหมาะสม สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าการส่งถ่ายความร้อน หาสาเหตุ วิเคราะห์ และอธิบายโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเพิ่มความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นโดยการควบคุมทิศทางการไหลของสารทำงาน

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ท่อความร้อนแบบสั่นเริ่มมีการศึกษาครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1990 โดย Akachi ได้จดสิทธิบัตรทะเบียนท่อความร้อนชนิดนี้ขึ้น ท่อความร้อนแบบสั่นสร้างจากท่อคาปิลารี่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติ นำมาขดกลับไปกลับมาดังแสดงในรูปที่ 1 ท่อความร้อนแบบสั่นจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก สามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) เมื่อเติมสารทำงานเข้าไปในท่อความร้อนแบบสั่นที่มีสภาพเป็นสุญญากาศ สารทำงานภายในท่อจะจัดเรียงเป็นฟองไอ (Vapor bubbles) และแท่งของเหลว (Liquid plugs) สลับกันอยู่ภายในท่อตามแนวยาวของท่อ เมื่อปลายโค้งเลี้ยวด้านหนึ่งได้รับความร้อน ก้อนของเหลวและฟองไอจะเกิดการเคลื่อนที่ตามแนวแกนด้วยการกระตุ้นการเคลื่อนที่ด้วยตัวมันเอง โดยมีสาเหตุมาจากการขับตัวของแรงดันฟองไอที่รุนแรงและรวดเร็วเนื่องจากการเดือดแบบฟองและการระเหยของฟิล์มของเหลว แล้วนำความร้อนไปถ่ายเทยังปลายโค้งเลี้ยวอีกด้านหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้ฟองไอเกิดการควบแน่นแล้วไหลกลับส่วนทำระเหยและทำงานเป็นวัฏจักรดังกล่าวต่อไป

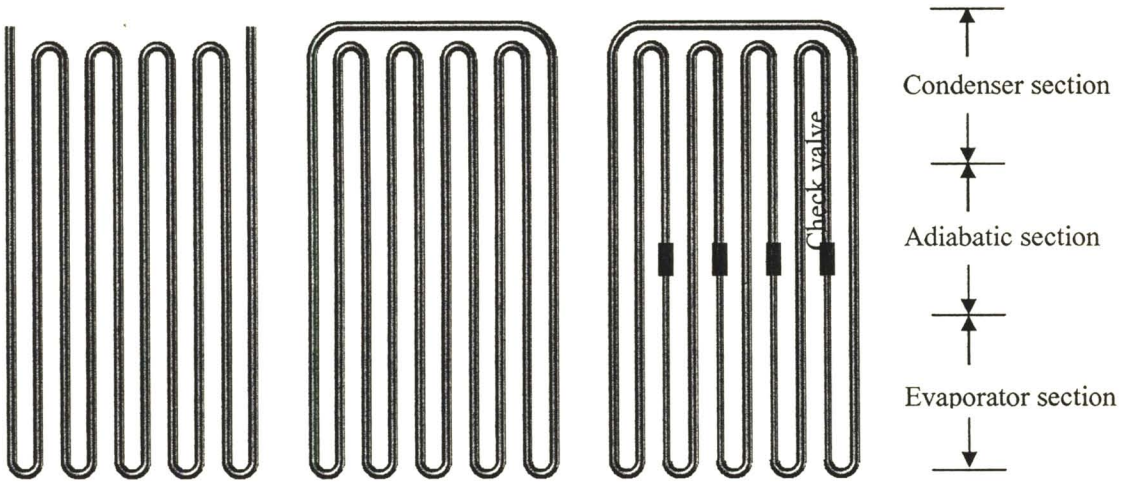
ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบได้ตามลักษณะรูปร่างดังนี้

- ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end pulsating heat pipe) สร้างจากท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ นำมาคดไปมาแล้วเชื่อมปิดปลายทั้งสองข้างแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 1.1 (ก) ดังนั้นในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling) ของสารทำงาน มีทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวท่อ

- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-loop pulsating heat pipe) สร้างจากท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ นำมาคดไปมาแล้วเชื่อมปลายทั้งสองเข้าด้วยกันให้มี

รูปร่างแบบวงรอบปิด เพื่อช่วยลดปัญหาการขัดขวางการเคลื่อนที่ที่บริเวณปลายปิด ดังรูปที่ 1.1 (ข) ดังนั้นในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะสูงกว่ากรณีแรกและเกิดจากการเคลื่อนไปมาของของไหลทำงานในแนวแกนของท่อสลับทิศทางไปมา จึงเป็นสาเหตุให้บางครั้งการไหลเวียนหยุดชั่วขณะ

- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ (Closed-loop pulsating heat pipe with check valves) โดยมีการติดวาล์วกันกลับไว้ในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป เพื่อให้ของไหลทำงานนำความร้อนไหลเวียนไปในทิศทางที่กำหนดได้อย่างง่ายขึ้น ดังรูปที่ 1.1 (ค) ซึ่งท่อความร้อนชนิดนี้มีค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สูงที่สุด แต่เป็นการยากในการสร้างและติดตั้งวาล์วกลับกันขนาดเล็ก

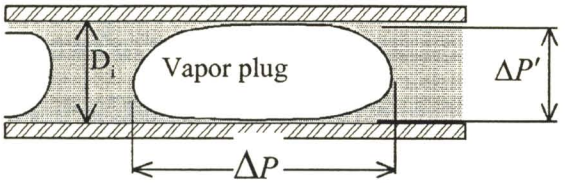


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 1.1 ประเภทของท่อความร้อน (ก) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (ข) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (ค) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ

การที่ท่อความร้อนแบบสั่นจะสามารถทำงานได้ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สารทำงานที่อยู่ภายในท่อความร้อนที่มีสภาพเป็นสุญญากาศต้องมีลักษณะเป็นแบบฟองไอและก้อนของเหลวสลับกันตลอดช่วงท่อความร้อน อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิวของสารทำงาน โดยมีเงื่อนไขในการเกิดลักษณะดังกล่าวคือ ความดันไอตามแนวแกนของท่อต้องมากกว่าความดันไอตามแนวขวาง (Maezawa *et al.*, 1995) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 สำหรับสารทำงานที่ทราบค่าความหนาแน่นและแรงตึงผิว สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของท่อคาปิลลารี่ที่สามารถเกิดฟองไอสลับกับก้อนของเหลวตลอดความยาวของท่อ ได้จาก

$$D_{i,\max} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l g}} \tag{1.1}$$



รูปที่ 1.2 การเกิดฟองไอสลับกับก้อนของเหลวในท่อคาปิลลารี่ (Maezawa *et al.*, 1995)

งานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1.2.1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.2.1.1 รูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

Khandekar S. and Groll M. (2003) สร้างท่อความร้อนแบบสั่นหนึ่งวงรอบเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทาง thermo-fluidics ภายใน พบว่าเมื่อป้อนกำลังความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอ รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนจะเปลี่ยนไป ที่กำลังความร้อนต่ำ ของไหลภายในท่อจะมีการไหลแบบสลักที่แอมปิจูดของการสั่นน้อย เมื่อมีการเพิ่มความร้อนป้อนเข้า ทำให้แอมปริจูดของการสั่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบแอมปริจูดเป็นความยาวรวมของวงรอบก็แสดงว่าของไหลร้อนสามารถไปถึงส่วนควบแน่นได้มากขึ้น ทำให้มีสมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มกำลังความร้อนขึ้นไปอีก จะเริ่มพัฒนาเข้าสู่การไหลแบบวงแหวนแล้วจะเปลี่ยนกลับไปเป็นการไหลแบบสลักไปมา ซึ่งจะมีการไหลเวียนในทิศทางเดียวนานขึ้นจนถึงสภาวะที่พบการไหลแบบวงแหวนที่ท่อหนึ่งและการไหลแบบสลักที่อีกท่อหนึ่ง ซึ่งเป็นการไหลทิศทางเดียวและมีความต้านทานเชิงความร้อนต่ำ ผลของการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะเชิงความร้อนของ CLPHP ไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลสองสถานะที่เกิดขึ้นขณะทำงานอย่างยิ่งด้วย

1.2.1.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ คือหากใช้สารทำงานชนิดเดียวกันและมีความยาวส่วนทำระเหยเท่ากันที่ 100 mm พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากขึ้น ค่าความหนาแน่นความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้จะมากขึ้นตามไปด้วย (Charoensawan *et al.*, 2003)

ในการสร้างสลักในท่อความร้อนจะเป็นผลมาจากความสมดุลของแรงโน้มและความตึงผิวซึ่งเป็นไปตามคำจำกัดความค่า Bond number ซึ่งมีค่าประมาณ 2 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจากเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดจะทำให้ค่าสมรรถนะลดลงเนื่องจากเป็นการเพิ่มแรง

เสียดทานในการเคลื่อนที่ของสารทำงาน และเป็นการลดพื้นที่สัมผัสในการส่งถ่ายความร้อน ทำให้เกิดการไหลแบบวงแหวนยากขึ้น (Khandekar *et al.*, 2003)

1.2.1.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าความหมายอีกนัยหนึ่งของจำนวนโค้งเลี้ยวคือความยาวรวม การเพิ่มความยาวรวมก็เสมือนกับการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยว ความยาวรวมนั้นมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ คือเมื่อความยาวรวมมากขึ้น ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะมากขึ้น ดังเช่นในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานเดียวกันพบว่าหากเพิ่มความยาวรวม จาก 5 m ไปเป็น 17.5 m ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 368 W ไปเป็น 1,114 W ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมีความยาวรวมเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีพื้นที่ในการส่งถ่ายความร้อนมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนโค้งเลี้ยวมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระหว่างค่าความต้านทานความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนสูงสุดดังสมการ (Charoensawan *et al.*, 2000)

$$R / R_{\max} = 15.775 N^{-1.1042} \qquad (1.2)$$

1.2.1.4 ผลของสัดส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

สัดส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ โดยพบว่าที่ช่วงสัดส่วนการเติมสาร 30% ถึง 50% ของปริมาตรทั้งหมด ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมสารทำงาน ช่วงสัดส่วนเติมสาร 50% ถึง 70% เป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดของทุกมุมเอียงการทำงาน และช่วงสัดส่วนเติมสารมากกว่า 70% ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องมาจากฟองไอและก้อนของเหลวมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ได้ง่าย และมีปริมาณมากพอที่จะใช้ในการส่งถ่ายความร้อน (Charoensawan *et al.*, 2000)

ช่วงสัดส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นจะอยู่ในช่วง 20 – 80 %จึงจะทำงานได้ท่อความร้อนแบบสั่นจริง เนื่องจากสัดส่วนการเติมใกล้ 100 % มีฟองน้อยทำให้ฟองไม่สามารถที่ดันของเหลวได้และยังขัดขวางการไหลเวียนของของเหลว ที่สัดส่วนการเติมใกล้ 0 % มีของเหลวน้อยมากมีแนวโน้มที่ส่วนทำระเหยจะเกิดการแห้ง ลักษณะการทำงานจะไม่เสถียรก็คือจะทำงานคล้ายเทอร์โมไซฟอน และมีของเหลวไหลเป็นครั้งคราว สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 % หรือต่ำกว่าจะทำให้มีโอกาสที่เกิดการไหลแบบวงแหวนง่ายซึ่งทำให้ประสิทธิภาพท่อความร้อนดีกว่าสัดส่วนการเติมที่สูงกว่าแต่ก็อาจจะมีของเหลวน้อยทำให้สมรรถนะลดลงได้ (Khandekar *et al.*, 2003)

1.2.1.5 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

ชนิดสารทำงานนั้นมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ R123 เอทานอล และน้ำ พบว่าน้ำให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ R123 และเอทานอล สำหรับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 mm แต่ในทางตรงข้าม R123 และเอทานอลให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนสูงกว่าน้ำ สำหรับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมีความตึงผิวสูง $(dP/dT)_{sat}$ ต่ำ ความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และความหนืดจลน์สูงกว่าเมื่อเทียบกับ R123 (Charoensawan *et al.*, 2003)

ไม่เพียงแต่รูปร่างทางเรขาคณิต มุมเอียงการทำงานและชนิดสารทำงานที่มีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ แต่การสั่นของความดันที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบก็มีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนด้วย ซึ่งพบว่าผลต่างของความดันระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น แอมปลิจูดและความถี่ของการสั่นของความดันก็มีผลต่อสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อน หากความดันแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าลดลง แอมปลิจูดของการสั่นของความดันลดลง และความถี่ของการสั่นของความดันเพิ่มขึ้นแล้ว จะให้สมรรถนะการส่งถ่ายความร้อนดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อมุมเอียงการทำงานน้อยลงยังเป็นผลให้ความดันแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และ พบอีกว่าหากค่าความหนาแน่นความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันอิ่มตัวภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย (Lee *et al.*, 2000)

1.2.2 ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

1.2.2.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ คือเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากขึ้น ค่าฟลั๊กความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้จะมากขึ้น (Rittidech *et al.*, 2007)

1.2.2.2 ผลของสัดส่วนสนทัดของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

สัดส่วนสนทัดคือสัดส่วนระหว่างส่วนทำระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ชี้ให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของท่อความร้อนดังเช่นหากสัดส่วนสนทัดมีค่ามากจะแสดงถึงท่อความร้อนที่มีลักษณะผอมและสูง และหากมีค่าน้อยก็จะแสดงถึงท่อความร้อนที่มีลักษณะอ้วนและสั้น ซึ่งพบว่าหากสัดส่วนสนทัดมีค่ามากขึ้นค่าความหนาแน่นความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ก็จะลดลง (Rittidech *et al.*, 2007)

1.2.2.3 ผลของสัดส่วนวาล์วกันกลับของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

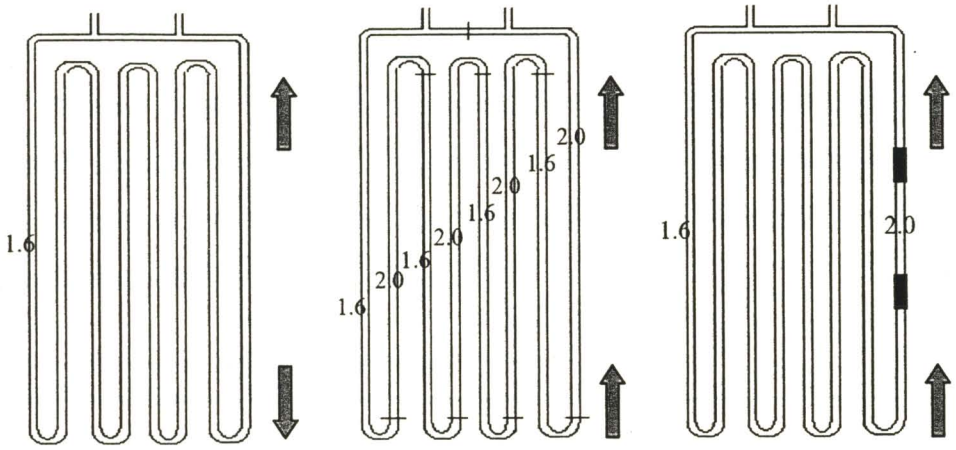
สัดส่วนวาล์วกันกลับคือสัดส่วนระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวต่อจำนวนของวาล์วกันกลับของท่อความร้อน จากการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนวาล์วกันกลับที่มากขึ้น (จำนวนวาล์วกันกลับลดลง) มีผลทำให้ความหนาแน่นความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้นั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนวาล์วกันกลับมากขึ้นความดันตกคร่อมของระบบจะสูงขึ้นและผลของแรงโน้มถ่วงที่มีต่อบอลภายในวาล์วกันกลับทำให้สมรรถนะโดยรวมลดต่ำลง (Rittidech *et al.*, 2007)

1.2.3 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอนี้เป็นท่อความร้อนที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อความคาดหวังว่าการส่งถ่ายความร้อนจะดีขึ้นเนื่องจากการควบคุมทิศทางการไหลเวียน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ศึกษามาแล้ว ดังนี้

Brian holley *et al.*, 2005 ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้การจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอนั้นสามารถทำงานได้ในช่วงที่กว้างกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ก่อนที่ท่อจะเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน อีกทั้งพบว่าค่าการส่งถ่ายความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นแตกต่างกัน

Shi Liu *et al.*, 2007 ได้ศึกษาถึงรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบดังนี้ (1) ท่อความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่เท่ากันสม่ำเสมอคือ 1.6 mm ดังรูปที่ 1.3 (ก) (2) ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กและใหญ่สลับกันไปทุกท่อคือ 1.6 และ 2 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 1.3 (ข) และ (3) ท่อความร้อนมีขนาดเหมือนกับแบบที่ (1) แต่จะมีท่อทางขวาสุดที่ใหญ่กว่าท่ออื่นเพียงท่อเดียวคือขนาด 2 mm ดังรูปที่ 1.3 (ค) จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบที่ (2) จะต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 แบบที่เหลือ เนื่องจากรูปแบบการไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Semi-annular flow และสังเกตเห็นการไหลแบบ Annular flow ในท่อร้อนและการไหลแบบ Slug flow ในท่อเย็นที่อยู่ติดกัน และการไหลเวียนของสารทำงานภายในนั้นประกอบด้วยฟองไอลอยจากส่วนทำระเหยขึ้นมาในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาดใหญ่ ผ่านส่วนกันความร้อนและเข้าไปควบแน่นในส่วนควบแน่นแล้วกลายเป็นของเหลวบางส่วนหรือทั้งหมด และไหลกลับลงมาโดยผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาดเล็กไปสู่ส่วนทำระเหย ดังนั้นทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการไหลเวียนเพิ่มขึ้นและค่าความต้านทานความร้อนจะลดลง

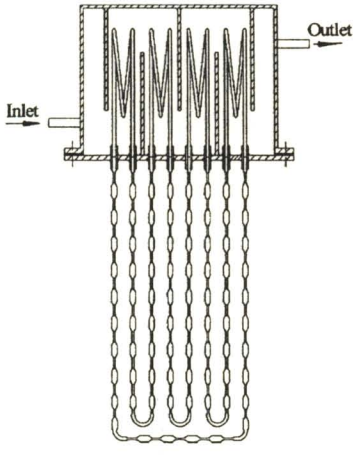


(ก) (ข) (ค)

หมายเหตุ ลูกศรแสดงถึงทิศทางการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อน

รูปที่ 1.3 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่โครงสร้างต่างๆ (Shi Liu *et al.*, 2007)

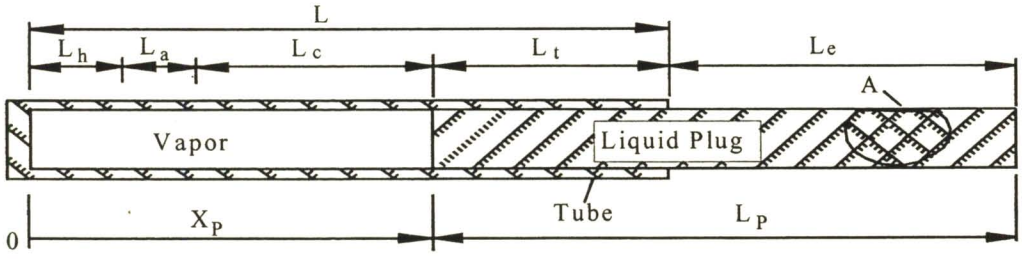
Haizhen xian *et al.*, 2007 ได้ศึกษาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าการนำความร้อน ประสิทธิผลของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ไม่สม่ำเสมอเปรียบเทียบกับท่อความร้อนแบบสั่นที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอโดยใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 mm เติมสารทำงานเป็นน้ำกลั่นที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 40 % และทำงานที่มุมเอียง 55 องศาจากแนวระนาบ พบว่า ท่อความร้อนที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าการนำความร้อนประสิทธิผลที่สูงกว่าที่กำลังความร้อนที่ต่ำ แต่ท่อความร้อนที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าการนำความร้อนประสิทธิผลที่สูงกว่าเมื่อกำลังความร้อนมากกว่า 100 W



รูปที่ 1.4 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ (Haizhen xian *et al.*, 2007)

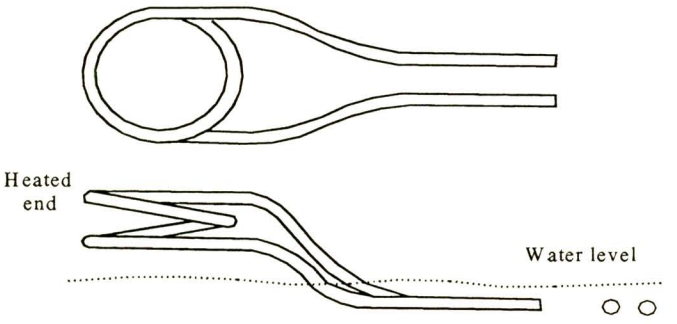
1.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อความร้อนแบบสั่น

Dobson *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ตัวแปรรวมของท่อความร้อนสั่นแบบปลายเปิดและปลายปิด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองรูปแบบทางเรขาคณิตอย่างง่าย 2 แบบ ที่ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมของของท่อความร้อนได้ สำหรับในท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิดนั้น ท่อจะเปิดที่ปลายด้านหนึ่งดังรูปที่ 1.5



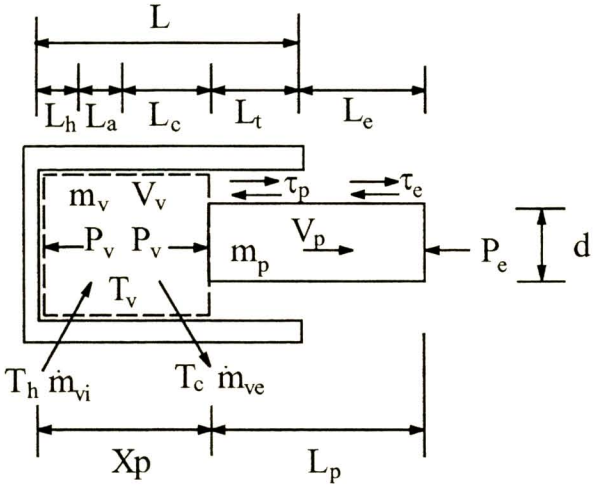
รูปที่ 1.5 แบบจำลองในหนึ่งมิติของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิด (Dobson *et al.*, 1999)

ให้ความร้อนตลอดความยาวท่อ L_h และความยาวท่อ L_c จะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และความยาวส่วนฉนวน L_a จะอยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้าน เมื่อปลายที่ปิดได้รับความร้อนของเหลวจะระเหยกลายเป็นไอทำให้ความดันสูงขึ้น แล้วดันให้แท่งของเหลวเคลื่อนที่ไปยังปลายที่เปิด ขณะที่แท่งของเหลวเคลื่อนที่ไปยังปลายที่เปิดนั้น ไอจำนวนมากจะสัมผัสกับช่วงความยาวของการหล่อเย็นทำให้มีการควบแน่นไอมากขึ้น จนมาถึงจุดที่อัตราการควบแน่นของไอมากกว่าอัตราการระเหยของของเหลว ที่ตำแหน่งนี้ความดันไอจะเริ่มลดลงและความดันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้แท่งของเหลวเกิดการหยุดนิ่ง แล้วตอนนี้ความดันบรรยากาศที่สูงกว่าจะสามารถดันแท่งของเหลวกลับมายังปลายที่ปิด แล้วแท่งของเหลวจะเกิดการหยุดนิ่งอีกครั้งเมื่อความดันไอสูงกว่าความดันบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้จึงมีการเคลื่อนที่แบบสั่นของแท่งของเหลวอย่างต่อเนื่อง ขณะที่แท่งของเหลวเคลื่อนที่ออกนอกช่วงความยาว L_h ไปยังปลายที่เปิดนั้น บริเวณหางของแท่งของเหลวจะทิ้งฟิล์มของเหลวบางๆ ไว้บนผนังท่อ ซึ่งจะแตกออกเป็นหยดเล็กๆ เกาะผนังท่อไว้ และจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง อีกปัจจัยหนึ่งที่พิจารณาคือ แท่งของเหลวไม่สามารถเคลื่อนที่กลับมายังจุดเริ่มต้นตรงปลายที่ปิดได้ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่ามีปริมาณของเหลวเพียงพอไหลกลับไปยังด้านปลายที่รับความร้อนจึงมีการสร้างท่อความร้อนดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 รูปร่างของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิดตามแบบจำลองของ Dobson (Dobson *et al.*, 1999)

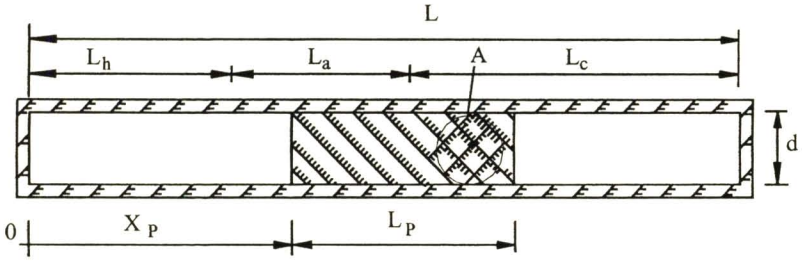
การจำลองการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิดทำโดยการสมมติให้ปริมาตรควบคุมของไอหนึ่งก้อนอยู่ระหว่างปลายที่ปิดและแท่งของเหลวโดยความยาวของแท่งของเหลวเดี่ยวคือ L_p ดังแสดงในรูปที่ 1.7 จะสมมติว่าไอเป็นไออิ่มตัวและมีอุณหภูมิเท่ากับฟิล์มของเหลวที่รับความร้อน และไม่มีความร้อนเข้าหรือออกจากฟิล์มของเหลวและฟองไอ



รูปที่ 1.7 แท่งของเหลวและฟองไอในแบบจำลองหนึ่งมิติของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิด (Dobson *et al.*, 1999)

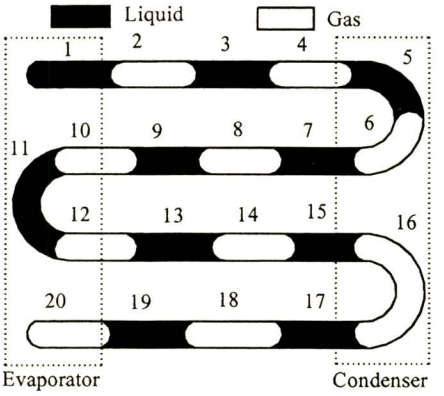
สมมุติให้แท่งของเหลวอัดตัวไม่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับไอ และไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งของเหลวกับสภาวะแวดล้อม จากสมมุติฐานเหล่านี้ทำให้ต้องการเพียงสมการการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวสำหรับการพิจารณาเท่านั้น ส่วนฟองไอสมมุติให้มีพฤติกรรมเป็นก๊าซในอุดมคติ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนต์แบบชัดแจ้ง (Explicit method) ในการแก้ปัญหาสมการการเปลี่ยนแปลง ขั้นตอนการคำนวณในการแก้ปัญหาทำได้โดยการพิจารณาว่าตำแหน่งของแท่งของเหลวสัมพัทธ์กับปลายปิด สมมุติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างผนังท่อส่วนที่รับความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างผนังท่อส่วนที่ทิ้งความร้อนและไอที่เหมาะสม

สำหรับท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1.8 นั้นมีการวิเคราะห์ในแบบเดียวกับกรณีของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิด แต่จะมีปริมาตรควบคุมของไอทั้งหมด 2 อัน แม้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายทั้ง 2 แบบนี้ ไม่ให้พฤติกรรมที่แท้จริงในการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่น แต่ก็ให้แนวโน้มทั่วๆ ไปเกี่ยวกับกลศาสตร์ทางความร้อนและของไหลภายในท่อความร้อนแบบสั่น และหากต้องการให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น ก็ทำได้โดยขยายแบบจำลองออกให้มีแท่งของเหลวหลายๆ อัน

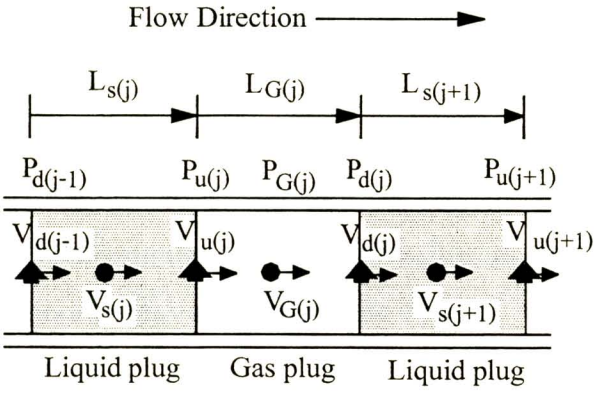


รูปที่ 1.8 แบบจำลองในหนึ่งมิติของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Dobson *et al.*, 1999)

Wong *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางทฤษฎีของท่อความร้อนแบบสั่นโดยใช้พื้นฐานจากวิธี Lagrangian โดยมีการจำลองท่อความร้อนแบบคาปิลลารี่ขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและใช้การสั่นของความดันแบบทันทีทันใด กระทำกับปลั๊กที่ส่วนทำระเหยสารทำงานภายในท่อความร้อนจะเรียงตัวเองเป็นขบวนไอ-ของเหลว (Slug-train) ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Slug-train สามารถอธิบายได้โดยกลุ่มของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่เชิงเส้น ซึ่งอ้างอิงจากรูปแบบ Lagrangian โดยการพิจารณาสมดุลของมวลและโมเมนตัมผ่านปริมาตรควบคุมของแท่งของเหลวและฟองไอ แล้วใช้ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตาอันดับ 4 (The 4thorder runge kutta technique) ในการแก้ระบบสมการอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่ง และการกำหนดสูตรทางคณิตศาสตร์จะอาศัยนิยามของระบบ Slug-train ดังรูปที่ 1.9 ส่วนรูปที่ 1.10 แสดงลักษณะตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด



รูปที่ 1.9 สัญลักษณ์ต่างๆ ของ Slug-train (Wong *et al.*, 1999)



รูปที่ 1.10 ภาพขยายแท่งของเหลวและฟองไอของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Wong *et al.*, 1999)

สำหรับสมมุติฐานของแบบจำลองจะมีดังนี้

- ไม่มีการดึงของเหลวกลับและไม่มีการแห้งของฟิล์มของเหลว
- ไม่มีการพิจารณาชั้นของฟิล์มของเหลว
- แท่งของเหลวจะไม่มีฟองไอ และฟองไอจะไม่มีของเหลวอยู่
- สมมุติว่าของเหลวอัดตัวไม่ได้และฟองไอมีพฤติกรรมเป็นเป็นก๊าซในอุดมคติ
- ไม่มีการพิจารณาการสูญเสียที่โค้งเลี้ยวต่างๆ
- ท่อความร้อนแบบสั่นอยู่ในแนวระดับ และไม่มีอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เมื่อนำแบบจำลองที่ได้นี้ไปใช้กับท่อความร้อนแบบสั่นที่ยาว 0.3 เมตร จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น พบว่าถ้าความยาวของแท่งของเหลวและฟองไอมีขนาดเท่ากันเท่ากับ 0.06 เมตร เมื่อมีความดันกระทำที่แท่งไอหรือของเหลวที่ปลายด้านหนึ่ง จะเกิดคลื่นความดันที่

สูงขึ้นในแท่งไอหรือของเหลวโดยแปรผันตามระยะห่างจากปลายที่ถูกกระทำนั้น และจะหยุดนิ่งในที่สุดเนื่องจากผลของความเสียดทานการสั่นของแท่งของเหลวและไอ แต่ถ้าเปลี่ยนความยาวของแท่งของเหลวและฟองไอเป็น 0.12 เมตร จะพบว่าเมื่อความยาวของแท่งไอและของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ในการสั่นของความดันจะลดลง

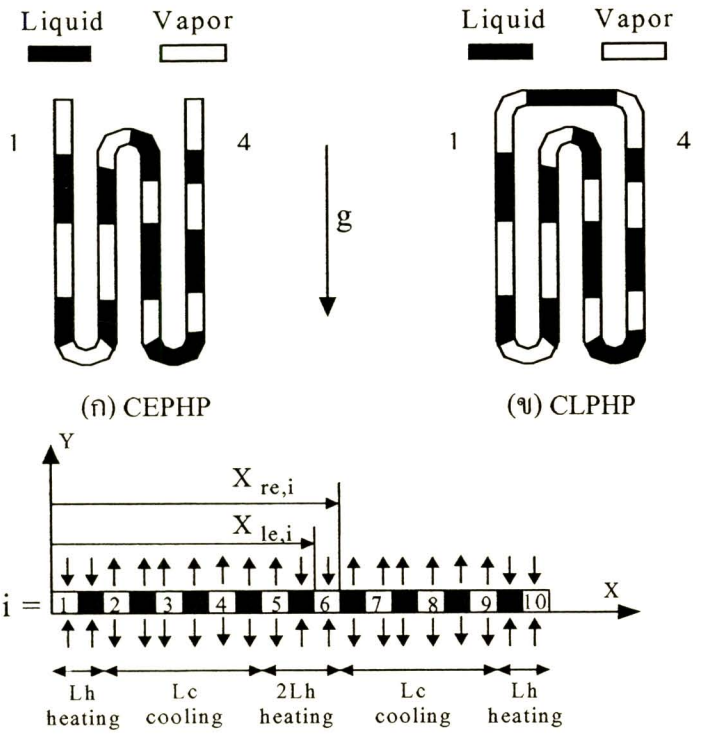
Shafii *et al.* (2001) ได้พัฒนาแบบจำลองของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด และวงรอบโดยจำลองพฤติกรรมของแท่งของเหลว และฟองไอในท่อความร้อนแบบสั่น ที่แหล่งให้ความร้อนอยู่สูงกว่าแหล่งระบายความร้อน โดยพิจารณาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน และแก้ปัญหาโดยใช้สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สำหรับแต่ละฟองไอและแท่งของเหลว ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหย และการควบแน่นมีค่าคงที่
- สมมุติว่าของเหลวอัดตัวไม่ได้และฟองไอเป็นก๊าซในอุดมคติ
- ไม่พิจารณาความดันสูญเสียที่โค้งเลี้ยว (สมมุติฐานนี้ใช้ได้กับท่อความร้อนแบบสั่นที่มีโค้งเลี้ยวไม่มากนัก)

ในแบบจำลองนี้ มีท่อที่ขนานกัน 4 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 1.11 ส่วนให้ความร้อนจะติดตั้งอยู่ที่ส่วนบนของท่อความร้อนแบบสั่น เวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในทิศทางเป็นบวกเมื่อแท่งของเหลวอยู่ในท่อที่ 1 และ 3 ดังนั้นเทอมของแรงโน้มถ่วงมีค่าเป็นบวก ในท่อที่ 2 และ 4 เวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงมีทิศทางบวกและเทอมของแรงโน้มถ่วงมีค่าเป็นลบ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 25 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 246378
เลขเรียกหนังสือ



รูปที่ 1.11 การกำหนดตำแหน่งฟองไอและแท่งของเหลว (Shafii *et al.*, 2001)

การถ่ายเทความร้อนในท่อความร้อนแบบสั่นกำหนดโดยการถ่ายเทความร้อนรวมจากส่วนให้ความร้อนไปยังส่วนรับความร้อน ประกอบด้วยการส่งถ่ายความร้อนเนื่องจากการระเหยและการควบแน่นของสารทำงาน การส่งถ่ายความร้อนระหว่างผนังท่อและแท่งของเหลวในรูปของการส่งถ่ายความร้อนสถานะเดียว

แบบจำลองของ Shafii *et al.* (2001) ระบุว่าผลของแรงโน้มถ่วงไม่มีนัยสำคัญกับสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด จำนวนทั้งหมดของแท่งไอจะมีค่าเท่ากับจำนวนของส่วนที่ให้ความร้อนหรือส่วนทำระเหย อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด และแบบวงรอบ เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความร้อนสัมผัสเป็นสำคัญ ส่วนการระเหยและควบแน่นเป็นกลไกในการผลักดันให้เกิดการไหลกลับไปกลับมาเท่านั้น และพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ อุณหภูมิผิวของส่วนทำระเหย และสัดส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อสมรรถนะของท่อความร้อนทั้ง 2 ชนิด โดยเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิผิวของส่วนทำระเหยลดลง อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งหมดมีค่าลดลง และพบว่าท่อความร้อนจะไม่ทำงานที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 89.4 %

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1 วิเคราะห์ ออกแบบ และทดสอบท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่สามารถส่งถ่ายความร้อนได้เพิ่มขึ้นโดยมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

1.3.2 ศึกษาตัวแปรด้านโครงสร้างและสารทำงานที่มีผลต่อการส่งถ่ายความร้อน และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบท่อความร้อนแบบสั่นชนิดพิเศษ

1.3.3 สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.3.4 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเพื่ออธิบายการทำงานและการส่งถ่ายความร้อน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 การศึกษาเชิงปริมาณ

1.4.1.1 ตัวแปรควบคุม

1 อุณหภูมิการทำงาน 60 °C

2 ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น มีค่าเท่ากัน ที่ 100 mm.

1.4.1.2 ตัวแปรที่ศึกษา

1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบวางตัวอยู่ในแนวดิ่งและแนวนอน (มุมเอียง 90 และ 0 องศาเมื่อวัดจากแนวระดับ)

2 สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อใหญ่ต่อท่อเล็ก 5 ค่า ได้แก่ 1.49, 1.91, 1.85 และ 3.11

3 สัดส่วนความยาวท่อใหญ่ต่อความยาวท่อเล็ก 5 ค่า ได้แก่ 0.33, 0.2, 1, 2 and 3

4 จำนวนโค้งเลี้ยวไม่น้อยกว่า 3 ค่า ได้แก่ 10 15 และ 30 โค้งเลี้ยว

5 สารทำงานไม่น้อยกว่า 3 ชนิด ได้แก่ R123 น้ำ และ เอทานอล

6 อุณหภูมิส่วนทำระเหย 4 ค่า ได้แก่ 70, 80, 90 และ 100 °C

7 สัดส่วนการเติมสารทำงาน 3 ค่า ได้แก่ 30, 50 และ 70% ของปริมาตรทั้งหมด

1.4.2 การศึกษาด้านแบบจำลอง

1 แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลเวียนของสารทำงานที่เกิดขึ้น

2 แบบจำลองสามารถทำนายค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น