

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานนับเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและการบริการ นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้นและแหล่งพลังงานสำรองลดลงอย่างต่อเนื่อง วงการอุตสาหกรรมก็เริ่มมุ่งความสนใจและความพยายามในการอนุรักษ์พลังงานมากขึ้น วิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้เกิดการอนุรักษ์พลังงาน คือ การนำความร้อนทิ้งจากขบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์อีก

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง ที่มีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งสะสมความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งระบายความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยหลักการของการกลายเป็นไอของสารทำงาน (Working fluid) ที่บรรจุภายในท่อความร้อน เนื่องจากค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนมีค่าต่ำมาก ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะสูง แต่อย่างไรก็ตามท่อความร้อนธรรมดาที่มีขีดจำกัดในการทำงาน ซึ่งเกิดจากขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อนจากแรงคาปีลลารี ทำให้ท่อความร้อนธรรมดา (Conventional heat pipe) ไม่สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ ส่งผลทำให้มีการพัฒนาสร้างท่อความร้อนชนิดใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า “ท่อความร้อนแบบสั่น” โดยทำการตัดท่อคาปีลลารีให้โค้งงอไปมาโดยแนวท่อที่ตัดนั้น วางตัวขนานกัน และไม่มีส่วนที่เป็นวัสดุพรุนภายในท่อ โดยเมื่อเติมสารทำงานในท่อความร้อนประเภทนี้ สารทำงานจะก่อตัวกันอยู่ในรูปแท่งของเหลว (Liquid slugs) สลับกับฟองไอ (Vapor bubbles) การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นของสารทำงาน ที่เกิดขึ้นด้วยการกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited oscillation) แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการคิดประดิษฐ์ท่อความร้อนแบบสั่น ซึ่งมีขนาดเล็กและส่งผ่านความร้อนได้ดีขึ้นแล้วก็ตาม แต่วิศวกรยังมีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นน้อยมาก จึงทำให้ไม่สามารถใช้ท่อความร้อนชนิดนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนดังกล่าว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่น (OHP) ในปัจจุบันเริ่มมีจำนวนมากขึ้น ทั้งท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบและท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเช็ควาล์ว โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งเน้นการศึกษาท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ เป็นชนิดที่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด (Gi et al., 1999) และเพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์การทำงานภายในของท่อความร้อน จึงได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อ

ความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ และนอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ยังมีการศึกษาไม่มากนัก โดยเฉพาะการศึกษาเชิงพรรณนที่สภาวะวิกฤต

โดยสารทำงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในท่อความร้อน คือ สารจำพวกคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) ซึ่งมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศและเป็นสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเกิดแนวคิดที่จะหาสารทดแทนที่ซึ่งสามารถลดปริมาณการทำลายชั้นบรรยากาศเพื่อใช้เป็นสารทำงานในท่อความร้อน โดยสารทำงานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ MP39 (สารผสมของ HPFC22 / HFC152a / HCFC124 สัดส่วนโดยมวล 53/13/34 %) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ Azeotropic blend ที่มีค่า Ozone Depletion Potential (ODP) เท่ากับ 0.03 โดยถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมาตรฐาน จึงมั่นใจได้ว่าหากนำสารทำงานดังกล่าวมาใช้งานจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก นอกจากนี้เพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน จึงเลือกสารละลายระหว่าง R123 และ R141b ที่สามสัดส่วนผสมโดยปริมาตร ได้แก่ 1:1 , 1:3 และ 3:1 ซึ่งเป็นสาร Non-azeotropic blend มาใช้ในงานวิจัยนี้อีกด้วย นอกจากนี้สารทำงานจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนก็มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษา รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานแบบ Azeotropic blend และ Non-azeotropic blend เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานทางด้านการประยุกต์ใช้งานในท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศต่อไป

## 1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ในปัจจุบันมีจำนวนไม่มากนัก จากจำนวนที่มีอยู่ทั้งหมดเป็นการศึกษาวิจัยที่กล่าวถึงเฉพาะหลักการพื้นฐานเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเชิงปริมาณของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่สภาวะปกติ

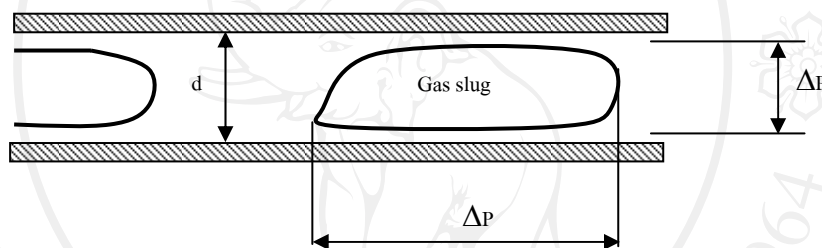
#### 1.2.1.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด

ความยาวส่วนทำระเหย หมายถึง ความยาวส่วนที่ได้รับความร้อนที่วัดจากปลายสุดของกลุ่มท่อด้านล่างส่วนทำระเหยไปยังรอยต่อระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนกันความร้อน โดยความยาวส่วนทำระเหยนั้นมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด จากการทดลองท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่ทำการศึกษาค่าความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิดที่มีค่าความยาวเท่ากับ 50, 100 และ 150 mm โดยสารทำงานที่ใช้คือ MP39 และ HP62 มีสัดส่วนการเติม 50 % พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิดที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด รองลงมาได้แก่ 100 และ 150 mm ตามลำดับ (ฉวีวิทย์, 2544)

### 1.2.1.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

การที่ท่อความร้อนแบบสันจะสามารถทำงานได้นั้น สารทำงานภายในท่อต้องอยู่ในลักษณะเป็นแบบฟองไอและก้อนของเหลวสลับกันตลอดช่วงความยาวท่อ อันเป็นผลเนื่องจากแรงตึงผิวของสารทำงาน ซึ่งในการเรียงตัวของสารทำงานมีเงื่อนไขในการเกิดลักษณะดังกล่าวคือ ความดันไอตามแนวแกนของท่อต้องมากกว่าความดันตามแนวขวาง(Maezawa., 2000) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 สำหรับสารทำงานที่ทราบค่าความหนาแน่นและแรงตึงผิว สามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของท่อคาปิลลารีที่สามารถเกิดฟองไอสลับกับก้อนของเหลวตลอดความยาวท่อ ดังสมการ (6)

$$d_{\max} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l g}} \quad (6)$$



รูปที่ 1.1 การเกิดฟองไอสลับกับก้อนของเหลวในท่อคาปิลลารี (Maezawa., 2000)

อัตราการส่งถ่ายความร้อนจะลดลง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จากการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้ MP39 และ HP62 เป็นสารทำงาน โดยใช้ท่อคาปิลลารีทองแดง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.06 และ 2.03 mm สัดส่วนการเติม 50 % ของปริมาตรทั้งหมด พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ให้ค่าความร้อนมากที่สุด คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.06 mm รองลงมา คือ 2.03 mm ทั้งสองสารทำงานมีแนวโน้มที่คล้ายกัน (ณัฐวิทย์, 2544)

### 1.2.1.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

จำนวนโค้งเลี้ยวมีความหมายอีกนัยหนึ่ง คือ ความยาวรวม เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวก็เปรียบเสมือนการเพิ่มความยาวรวม ซึ่งความยาวรวมนั้นมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด กล่าวคือเมื่อความยาวรวมมากขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง โดยจากการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบปลายปิดที่ใช้สารทำงานเป็น MP39 และ HP62 ในสัดส่วนการเติม 50 % ซึ่งทำการเปลี่ยนความยาวรวมของท่อความร้อนจาก

10, 15 และ 20 m ตามลำดับ พบว่าค่าความยาวรวมต่อความร้อนที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อน เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคือ 10, 15 และ 20 m (ณัฐวิทย์, 2544)

#### 1.2.1.4 ผลของมุมเอียงการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

ผลของมุมเอียงการทำงาน หมายถึง มุมที่วัดจากแนวระนาบของกลุ่มท่อความร้อนกับระนาบในแนวระดับ หากมุมเอียงมีค่าเป็นบวก แสดงว่าส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น แต่ในทางกลับกัน หากส่วนระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่นมุมเอียงจะมีค่าเป็นลบ โดยมุมเอียงนั้นมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบดังนี้ ได้มีการศึกษาท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้สารทำงานเป็น MP39 และ HP62 สามารถที่ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนมุมเอียงเทียบกับแนวระดับจาก  $-90^{\circ}$  ถึง  $90^{\circ}$  พบว่ามุมเอียงการทำงานมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด ซึ่งสารทำงาน MP39 และ HP62 ทำงานได้เมื่อมุมเอียงมีค่าเป็นบวกเท่านั้น กล่าวคือ ส่วนทำระเหยจะต้องอยู่ไม่สูงกว่าควบแน่น โดยพบว่ามุมเอียงของการทำงานช่วง  $50-60^{\circ}$  เป็นช่วงที่ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุด(ณัฐวิทย์, 2544)

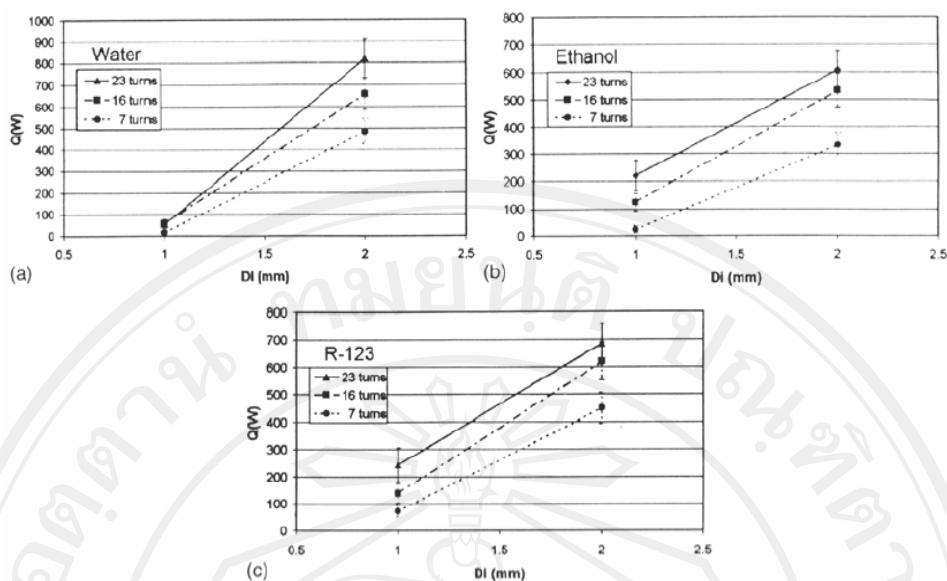
#### 1.2.2 กรณีเชิงปริมาณของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะปกติ

##### 1.2.2.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

ความยาวส่วนทำระเหยนั้นมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ คือ เมื่อความยาวส่วนทำระเหยมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนต่ำลง โดยจากการศึกษาขนาดความยาวส่วนทำระเหยที่ 50, 100 และ 150 mm สารทำงานที่ใช้ได้แก่ MP39 และ HP62 จากการทดลองพบว่าที่มุมเอียงการทำงาน  $90^{\circ}$  ความยาวส่วนทำระเหยขนาด 50 mm ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด รองลงมา คือ 100 และ 150 mm ตามลำดับ (อภิมน, 2545)

##### 1.2.2.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ โดยจากการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm และ 2 mm สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50% สารทำงานที่ใช้ได้แก่ น้ำเอทานอล และ R123 ที่ค่าความยาวส่วนทำระเหย 100 mm พบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุม  $90^{\circ}$  จากแนวระดับ (Charoensawan et al., 2003) แสดงดังรูปที่ 1.2



**รูปที่ 1.2** ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ (Charoensawan et al., 2003)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบโดยใช้สารผสม MP39 และ HP62 เป็นสารทำงาน ท่อความร้อนที่ใช้ทำจากท่อคาปิลลารีทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66, 1.06 และ 2.03 mm พบว่าท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตนั้น ที่มุมเอียงทำงาน  $90^\circ$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และสำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตจะสามารถทำงานที่มุมเอียงการทำงานเป็นลบ ได้ดีเทียบเท่ากับที่มุมเอียงการทำงานเป็นบวก จึงสรุปได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนขนาด 2.03 mm ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือ 1.06 และ 0.66 mm (อภิมน, 2545)

### 1.2.2.3 ผลของจำนวนโค้งเกี่ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

ความยาวรวมนั้นมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ดังนั้นเมื่อความยาวรวมมากขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมากขึ้น จากการทดสอบท่อความร้อนที่มีขนาดความยาวท่อรวมคือ 5, 10 และ 15 m ที่ความยาวส่วนทำระเหยที่มีค่าเท่ากับ 50, 100 และ 150 mm ตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66, 1.06 และ 2.03 mm โดยใช้สารทำงานเป็นสารผสม MP39 และ HP62 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ที่ค่าความยาวรวมของท่อความร้อนเท่ากับ 5 m ในตำแหน่งมุมเอียงการทำงาน  $90^\circ$  รองลงมาได้แก่ 10 และ 15 m ตามลำดับ (อภิมน, 2545)

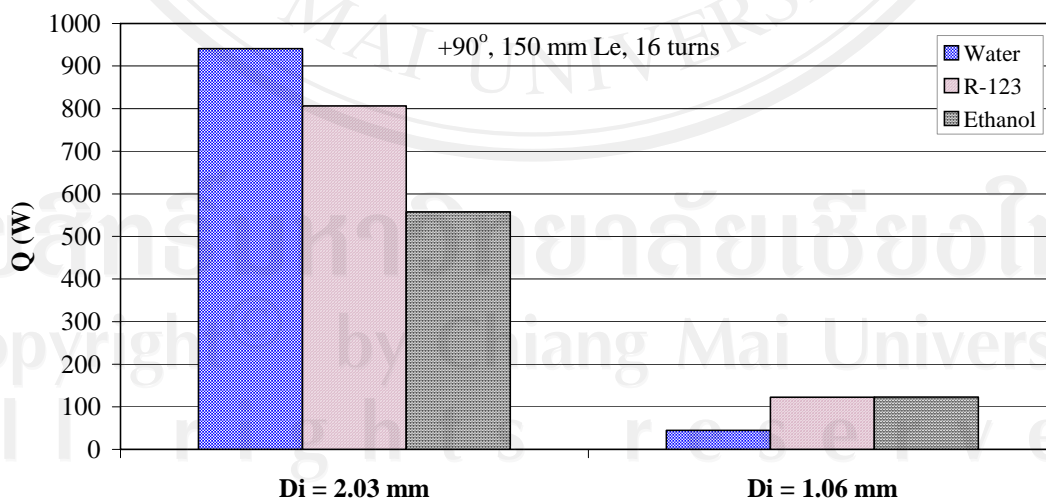


#### 1.2.2.4 ผลของมุมเอียงการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

มุมเอียงการทำงานมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ดังนี้ ได้มีการศึกษาท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานเป็น MP39 และ HP62 ในสัดส่วนการเติม 50 % ซึ่งทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนมุมเอียงเทียบกับแนวระดับจาก  $-90^{\circ}$  ถึง  $90^{\circ}$  พบว่ามุมเอียงการทำงานมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ โดยสำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตนั้น มุมเอียงการทำงานช่วง  $60^{\circ}$  ถึง  $90^{\circ}$  จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และสำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตจะสามารถทำงานได้ดีที่มุมเอียงเป็นลบได้ดีเทียบเท่ากับที่มีมุมเอียงการทำงานเป็นบวก (อภิมัน, 2545)

#### 1.2.2.5 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

ชนิดของสารทำงานมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จากการศึกษาผลของสารทำงานโดยเปรียบเทียบสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ R123 เอทานอลและ น้ำ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 2 mm ที่ทำงานในแนวตั้ง น้ำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับ R123 และเอทานอล แต่ในทางตรงข้าม R123 และเอทานอลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ ในกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาด 1 mm ความสัมพันธ์ระหว่างสารทำงานกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว มุม  $90^{\circ}$  จากแนวระดับ แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อน

(Charoensawan et al., 2003)

### 1.2.3 กรณีเชิงคุณภาพของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด ที่สภาวะปกติ

#### 1.2.3.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

ความยาวส่วนทำระเหยมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยเมื่อเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยขึ้น รูปแบบการไหลภายในมีการเปลี่ยนแปลงจากแบบก้อน (Slug flow) และแบบฟอง (Bubble flow) มาเป็นรูปแบบการไหลแบบก้อนและแบบวงแหวน (Annular flow) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 mm เป็น 150 mm รูปแบบการไหลสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความเร็วฟองไหลลดลงเล็กน้อย ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนลดลงเล็กน้อย ในขณะที่แอมพลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่าความหนาแน่นความร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว (Rittidech et al., 2003)

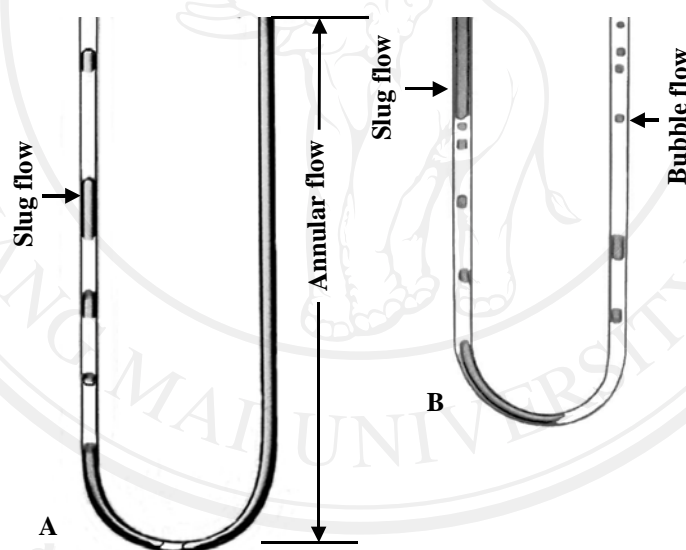


Figure	$L_c$ (mm)	Main flow pattern	$L_v$ (mm)	$V_v$ (m/s)	$\omega$ (Hz)	$\lambda$ (°C)	$q$ (W/m <sup>2</sup> )
A	150	Slug + Annular	50-57	0.40	0.31	3.22	4,578
B	50	Slug + Bubble	1-35	0.45	0.38	0.36	18,189

รูปที่ 1.4 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด (Rittidech et al., 2003)

### 1.2.3.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

จำนวนโค้งเลี้ยวไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด คือ เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มมากขึ้นรูปแบบการไหลหลักภายในยังคงเป็นแบบก้อนและแบบฟอง ในการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากมีการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวขึ้นจาก 10 โค้งเลี้ยว เป็น 28 โค้งเลี้ยว รูปแบบการไหลสอดคล้องกับข้างต้นที่ได้กล่าวไป ดังแสดงในรูปที่ 1.5 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความยาวฟองไอและความเร็วฟองไอเกือบจะคงที่ ความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเกือบจะคงที่และค่าความหนาแน่นความร้อนเกือบจะคงที่เช่นเดียวกัน (Rittidech et al., 2003)

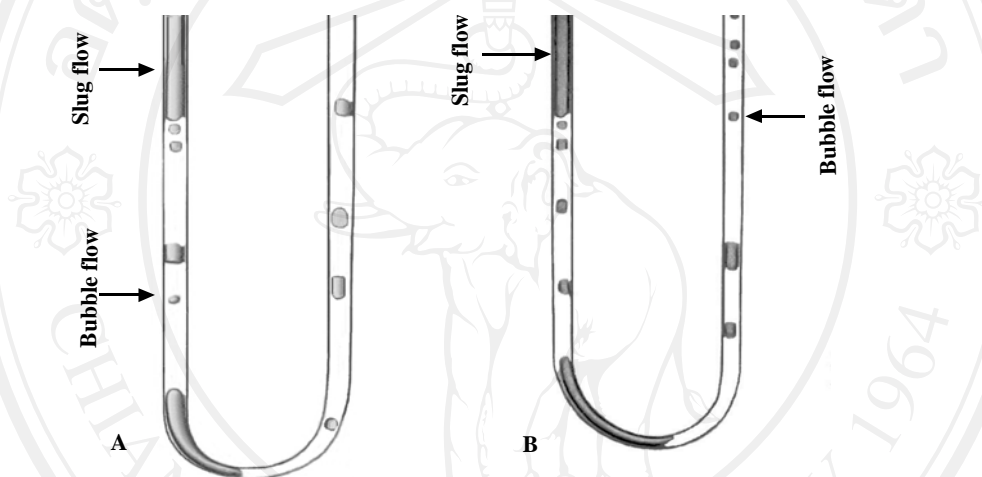


Figure	Turn	Main flow pattern	$L_v$ (mm)	$V_v$ (m/s)	$\omega$ (Hz)	$\lambda$ (°C)	$q$ (W/m <sup>2</sup> )
A	28	Slug + Bubble	2-38	0.43	0.41	0.33	18,102
B	10	Slug + Bubble	1-35	0.45	0.38	0.36	18,189

รูปที่ 1.5 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด (Rittidech et al., 2003)



### 1.2.3.3 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด

ชนิดของสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด คือ เมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลภายในจะเปลี่ยนจากแบบก้อนและฟอง จะเปลี่ยนรูปแบบการไหลมาเป็นแบบก้อนและแบบฟอง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย จากการทดลองท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิดที่กันมิติเดียว พบว่าหากเปลี่ยนสารทำงานจาก R123 เป็น R141b เปรียบเสมือนกับการเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก 160 kJ/kg เป็น 213 kJ/kg รูปแบบการไหลสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น ดังรูปที่ 1.6 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้นรวดเร็ว ความเร็วฟองไอลดลงอย่างรวดเร็ว ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิกภายในท่อความร้อนลดลงเล็กน้อย ในขณะที่แอมพลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิกภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่าความหนาแน่นความร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว (Rittidech et al., 2003)

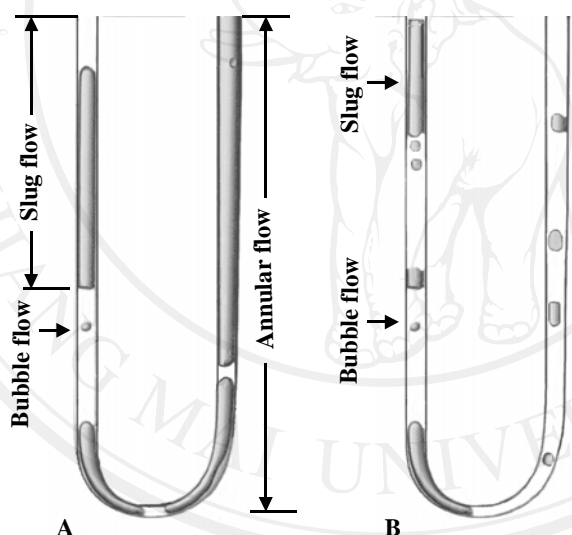


Figure	$H_{fg}$ (kJ/kg)	Main flow pattern	$L_v$ (mm)	$V_v$ (m/s)	$\omega$ (Hz)	$\lambda$ (°C)	$q$ (W/m <sup>2</sup> )
A	213	Slug + Annular	1-50	0.35	0.38	2.02	10,840
B	160	Slug + Bubble	1-35	0.43	0.41	0.33	18,102

รูปที่ 1.6 ผลของชนิดสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด (Rittidech et al., 2003)

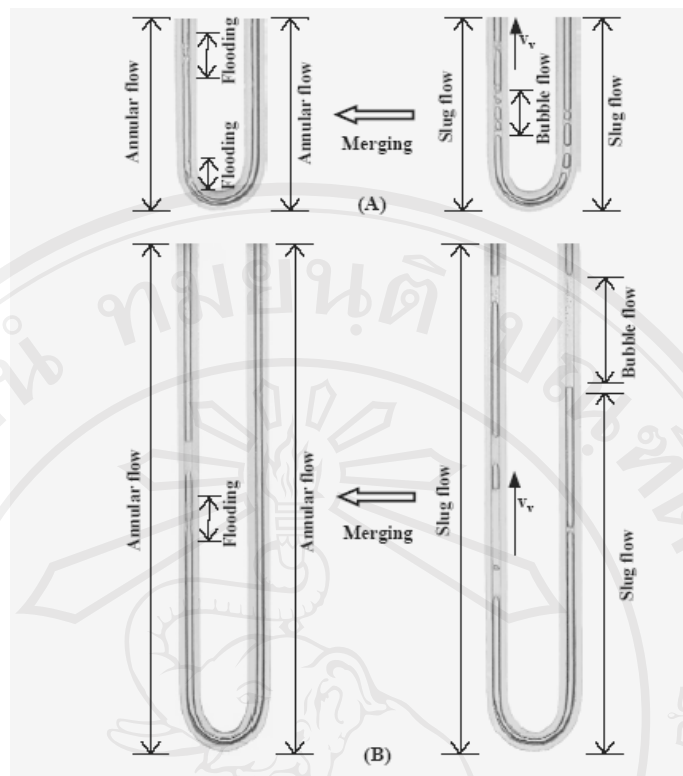
#### 1.2.3.4 ผลของอุณหภูมิการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิตปลายปิด

อุณหภูมิการทำงาน หมายถึง อุณหภูมิของไอภายในท่อความร้อนที่ทำการวัดในส่วนกันความร้อน ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่า ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิการทำงาน สามารถทำได้โดยการควบคุมที่อุณหภูมิไอโดยตรง หรือทำการเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน อุณหภูมิการทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิตปลายปิด ซึ่งก็คือเมื่ออุณหภูมิการทำงานมากขึ้น ฟองไอและก้อนของเหลวจะมีความยาวนานน้อยลง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น อีกทั้งความเร็วในการหมุนเวียนเพิ่มขึ้นด้วย (Gi et al., 1999)

#### 1.2.4 กรณีเชิงคุณภาพของท่อความร้อนแบบสันชนิตวงรอบ ที่สถานะปกติ

##### 1.2.4.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิตวงรอบ

ความยาวส่วนทำระเหยมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิตวงรอบ โดยเมื่อทำการเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยขึ้น รูปแบบการไหลภายในยังคงเป็นแบบก้อนผสมกับแบบฟองเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีอัตราการเกิดการไหลแบบแหวนลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิตวงรอบที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากทำการเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 mm เป็น 150 mm รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่ได้กล่าวมาข้างต้นดังในรูปที่ 1.7 ยังพบอีกว่าอัตราการหายไปของฟองไอ (Collapsing ratio) ลดลง ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนแบบสันชนิตวงรอบแทบจะคงที่ และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลง เนื่องจากหากความยาวส่วนทำระเหยลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้ง่ายขึ้นและมีเวลาในการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอ (Charoensawan et al., 2003)

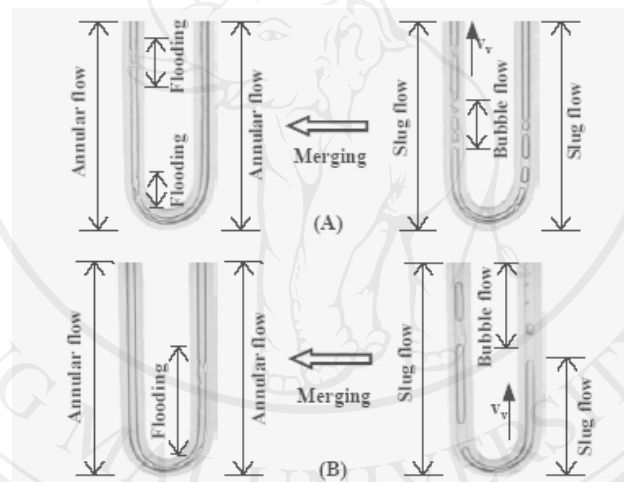


CLOHP with 10 using R123 as working fluid					
Phenomena	Fig.A	Fig.B	Phenomena	Fig.A	Fig.B
$L_e$ (mm)	50	150	Collapse (%)	1300	500
Merging (time/sec)	2	1	Frequency (Hz)	0.41	0.46
$L_v$ (mm)	20	50	Amplitude ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.28	0.72
$V_v$ (mm)	0.5	1.13	$q$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	8,313	3,001

รูปที่ 1.7 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (Charoensawan et al., 2003)

#### 1.2.4.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ

จำนวนโค้งเลี้ยวมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ โดยเมื่อหากเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวขึ้น รูปแบบการไหลภายในก็ยังคงเป็นแบบก่อกวนผสมกับแบบวงแหวนเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีอัตราการเกิดการไหลแบบวงแหวนลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลง จากการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานเดียวกันพบว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 10 โค้งเลี้ยว เป็น 28 โค้งเลี้ยว รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับข้อมูลข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.8 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอัตราการหายไปของฟองไอ (Collapsing ratio) ลดลง ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ในขณะที่แอมพลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้น ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนแทบจะคงที่และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควมแน่นได้ง่ายขึ้นและมีเวลาในการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอ (Charoensawan et al., 2003)



CLOHP with 10 using R123 as working fluid					
Phenomena	Fig.A	Fig.B	Phenomena	Fig.A	Fig.B
N (turns)	10	28	Collapse (%)	1300	800
Merging (time/sec)	2	0.5	Frequency (Hz)	0.41	0.44
L <sub>v</sub> (mm)	20	25	Amplitude (°C)	0.28	1.09
V <sub>v</sub> (mm)	0.5	0.63	q (W/m <sup>2</sup> )	8,313	7,603

รูปที่ 1.8 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ (Charoensawan et al., 2003)

ในการวิเคราะห์หุ้มเอียงในการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงจำนวนโค้งเฉลี่ยวิกฤตด้วย หากในกรณีที่มีค่า  $N < N_{crit}$  พบว่ามุมเอียงการทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ หากในกรณีที่มุมเอียงการทำงานมากขึ้น รูปแบบการไหลภายในจะเปลี่ยนจากแบบก่อนไอขนาดใหญ่หนึ่งเพียงอย่างเดียว ไปเป็นรูปแบบการไหลแบบก่อนผสมกับแบบวงแหวนส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งกรณี  $N < N_{crit}$  ค่าความหนาแน่นการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่มุมเอียงการทำงาน  $90^\circ$  (Khandekar et al., 2003) โดยมีความสอดคล้องกับในการศึกษาหนึ่งที่ว่า เมื่อมุมเอียงการทำงานน้อยลักษณะของฟองไอและก้อนของเหลวจะมีขนาดยาว และสามารถสังเกตเห็นการไหลแบบแยกชั้น แต่หากมุมเอียงการทำงานมากขึ้น ลักษณะของฟองไอและก้อนของเหลวจะมีขนาดเล็กลงและรูปแบบการไหลเป็นแบบก่อน และยังสอดคล้องกับการศึกษาที่ว่า การสันของสารทำงานภายในมีความคล่องแคล่วที่สุดเมื่อมุมเอียงการทำงาน  $90^\circ$  (Lee et al., 1999) ส่วนในกรณีที่ค่า  $N > N_{crit}$  พบว่ามุมเอียงมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ โดยหากทำการเพิ่มมุมเอียงให้มากขึ้น รูปแบบการไหลภายในจะเปลี่ยนจากแบบก่อน เพียงอย่างเดียวไปเป็นแบบวงแหวนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าความหนาแน่นความร้อนสูงสุดอยู่ที่มุมเอียงการทำงาน  $70^\circ$  (Khandekar et al., 2003)

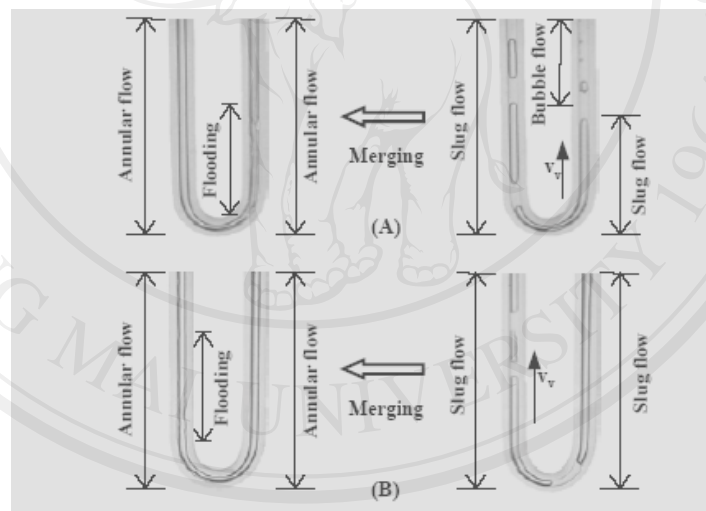
#### 1.2.4.3 ผลของสัดส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

สัดส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จากการศึกษากลไกการทำงานของท่อความร้อนแบบสัน โดยการสังเกตรูปแบบการไหลภายใน ซึ่งใช้ชุดทองเหลืองและแผ่นอะคริลิก ทำช่องทางการไหลมีขนาด 1.5 mm ทั้งความกว้างและความลึก แล้วทำให้เป็นช่องทางการไหลเชื่อมต่อกัน โดยมีลักษณะเป็นวงรอบ จำนวน 4 โค้งเฉลี่ยความยาวรวม 220 mm สารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล แปรสัดส่วนการเติมในช่วง 20-80 % อุณหภูมิการทำงานของท่ออยู่ในช่วง 313.5-333.35 K และทำการปรับมุมเอียงตั้งแต่  $30^\circ$ - $90^\circ$  บันทึกภาพโดยใช้กล้องความเร็วสูง ความเร็วชัตเตอร์ 1/1200 s พบว่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเกิดจากการสันของสารทำงานในท่อตามทิศทางของแนวแกน โดยการหดตัวและขยายตัวของของเหลวและไอ ซึ่งของเหลวที่ควบแน่นจะไหลย้อนกลับส่วนการทำระเหยเป็นการไหลสวนทางอย่างง่าย หรือ Rivulet flow ตามผนังด้านในของท่อมากกว่าการไหลแบบ Capillary slug นอกจากนี้ยังพบว่าการสันที่รุนแรงสามารถพบได้ที่สัดส่วนการเติมที่ 40-60% ที่มุมเอียงการทำงาน  $90^\circ$  (Lee et al., 1999)



#### 1.2.4.4 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ

ชนิดของสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ โดยเมื่อเปลี่ยนสารทำงานจาก R123 เป็น R141b ที่เปรียบเสมือนกับการเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ รูปแบบการไหลภายในยังคงเป็นแบบก่อก่อนผสมกับแบบฟองเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันก็อาจเกิดการไหลแบบวงแหวนลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย จากการศึกษาท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบที่มีมิติขนาดเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก  $160.96 \text{ W/m}^2$  เป็น  $213.98 \text{ W/m}^2$  รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.9 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอัตราการหายไปของฟองไอ (Collapsing ratio) ลดลงเล็กน้อย ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ความเร็วฟองไอเพิ่มขึ้น ในขณะที่แอมพลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิกายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้น ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิกายในท่อความร้อนแทบจะคงที่และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีเวลาเพียงพอในการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย (Charoensawan et al., 2003)



CLOHP with 10 using R123 as working fluid					
Phenomena	Fig.A	Fig.B	Phenomena	Fig.A	Fig.B
$H_{fg}$ (kJ/kg)	160.96	213.98	Collapse (%)	800	700
Merging (time/sec)	1.5	1.25	Frequency (Hz)	0.44	0.50
$L_v$ (mm)	25	35	Amplitude ( $^{\circ}\text{C}$ )	1.09	1.67
$V_v$ (mm)	0.63	0.75	$q$ ( $\text{W/m}^2$ )	7,603	7,202

รูปที่ 1.9 ผลของชนิดสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (Charoensawan et al., 2003)

#### 1.2.4.5 กลไกการไหลภายใน

โดยการไหลแบบสั้นของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบเกิดจากการเดือดแบบฟองที่ส่วนทำระเหย การสั้นของฟองไอและการเคลื่อนที่จากไปของฟองไอที่ส่วนกันความร้อนรูปแบบการไหลที่ส่วนทำระเหยโดยทั่วไปนั้น ในตอนแรกเมื่อท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบได้รับความร้อนรูปแบบการไหลภายในจะเป็นแบบก้อนและอยู่ในสภาวะสมดุล จากนั้นหากมีการเพิ่มหรือลดความร้อนของระบบ การเดือดแบบฟองจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่เป็นระเบียบที่ส่วนล่างของส่วนทำระเหย เนื่องจากการโตขึ้นของฟองอย่างไม่เป็นระเบียบ ฟองไอนี้จึงสามารถสั้นด้วยตัวเองในแนวแกนและแนวขวางของท่อ และเคลื่อนที่สู่ส่วนควบแน่นต่อไป ส่วนของเหลวที่ควบแน่นก็ไหลกลับสู่ส่วนควบแน่นนั้น การไหลจะอยู่ในรูปแบบแยกชั้นหรือแบบริว ส่วนรูปแบบการไหลที่ส่วนกันความร้อนโดยทั่วไป คือ ฟองไอที่เกิดขึ้นจากส่วนทำระเหยจะไหลผ่านไปยังส่วนควบแน่นอย่างรวดเร็ว กลุ่มก้อนไอนี้ที่มีการสั้น จะมีฟองเล็ก ๆ แยกตัวออกมา โดยฟองเล็ก ๆ เหล่านี้จะไหลไปยังส่วนควบแน่นและค่อยหายไปทีละสุด ซึ่งในจังหวะที่ของเหลวควบแน่นได้ไหลกลับลงมาตามผนังท่อก็จะปะทะกับฟองไอที่ส่วนกันความร้อน จึงสามารถสังเกตเห็นการหอบซึ่งเกิดจากการชนกันและการท่วมที่เกิดจากความเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างไอและของเหลว (Lee et al., 1999)

#### 1.2.5 กรณีเชิงปริมาณของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิด ที่สภาวะวิกฤต

##### 1.2.5.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิด

ผลของความยาวส่วนทำระเหยมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ เมื่อความยาวส่วนทำระเหยมากขึ้น ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตจะลดลง จากการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิดที่ทำด้วยท่อคาปิลารีทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66, 1.06 และ 2.03 mm สารทำงานที่ใช้ คือ MP39 และ HP62 ด้วยสัดส่วนการเติม 50 % โดยที่ค่าความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่น มีค่าเท่ากับ 50, 100 และ 150 mm ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความยาวส่วนทำระเหยมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตที่มุมการทำงาน  $90^{\circ}$  โดยความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จะให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตที่มากที่สุด รองลงมาคือ ที่ 100 และ 150 mm ตามลำดับ (ประภัสสร, 2546)

##### 1.2.5.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิดมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤต กล่าวคือ หากเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิด ทำให้ผลต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีการศึกษาท่อความร้อนแบบสั้นชนิดปลายปิดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66, 1.06 และ 2.03 mm สารทำงานที่ใช้ได้แก่ MP39 และ

HP62 สักส่วนการเติมสารทำงานประมาณ 50 % โดยปริมาตรทั้งหมดของท่อ พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตที่มุมการทำงาน  $90^\circ$  นั้น ท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ 1.06 และ 0.66 mm ตามลำดับ (ประภัสสร, 2546)

#### 1.2.5.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

จำนวนโค้งเลี้ยวมีผลต่อขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยเมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวให้มากขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตจะเพิ่มขึ้น จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก  $14.85 \text{ W/m}^2$  เป็น  $23.95 \text{ W/m}^2$  ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มมากขึ้น สารทำงานจะเรียงตัวเป็นแบบฟองไอสลับกับก้อนของเหลวได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ฟองไอสลับกับก้อนของเหลวในท่อความร้อนที่จำนวนโค้งเลี้ยวมากจะสามารถสั่นด้วยตัวเองได้โดยง่าย ดังนั้นของเหลวกลั่นตัวจึงสามารถไหลกลับมายังส่วนทำระเหยได้ดีกว่ากรณีท่อความร้อนมีจำนวนโค้งเลี้ยวน้อย (Katpradit et al., 2003)

#### 1.2.5.4 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

ชนิดสารทำงานนั้นมีผลต่อขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมากขึ้น ค่าความหนาแน่นความร้อนวิกฤตจะเพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดเดียวกัน แต่ทำการเปลี่ยนสารทำงานซึ่งหากเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก  $156 \text{ kJ/kg}$  เป็น  $2356 \text{ kJ/kg}$  มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตจะเพิ่มขึ้นจาก  $17.98 \text{ W/m}^2$  เป็น  $23.95 \text{ W/m}^2$  เนื่องจากสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ จึงสามารถกลายเป็นไอได้ง่าย รวมไปถึงความดันไอที่ส่วนทำระเหยสูง ทำให้เกิดการหน่วงการไหลกลับของของเหลวกลั่นตัวจากส่วนควบแน่นมายังส่วนทำระเหยได้ง่ายขึ้น เป็นสาเหตุทำให้เกิดการแห้งที่ส่วนทำระเหย (Katpradit et al., 2003)

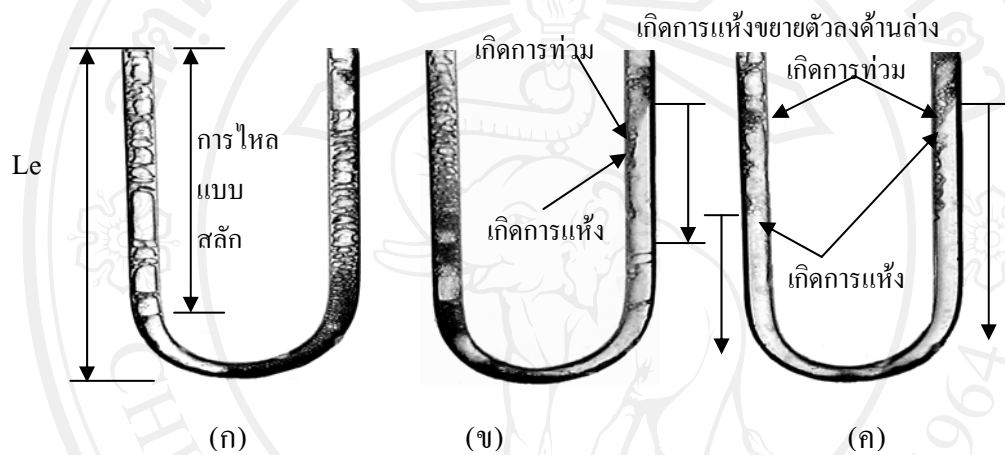
#### 1.2.6 กรณีเชิงปริมาณของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต

ยังไม่ปรากฏการศึกษาเกี่ยวกับผลของตัวแปรต่าง ๆ ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤต

## 1.2.7 กรณีเชิงคุณภาพของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด ที่สภาวะวิกฤต

### 1.2.7.1 ผลสัดส่วนขนาดของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

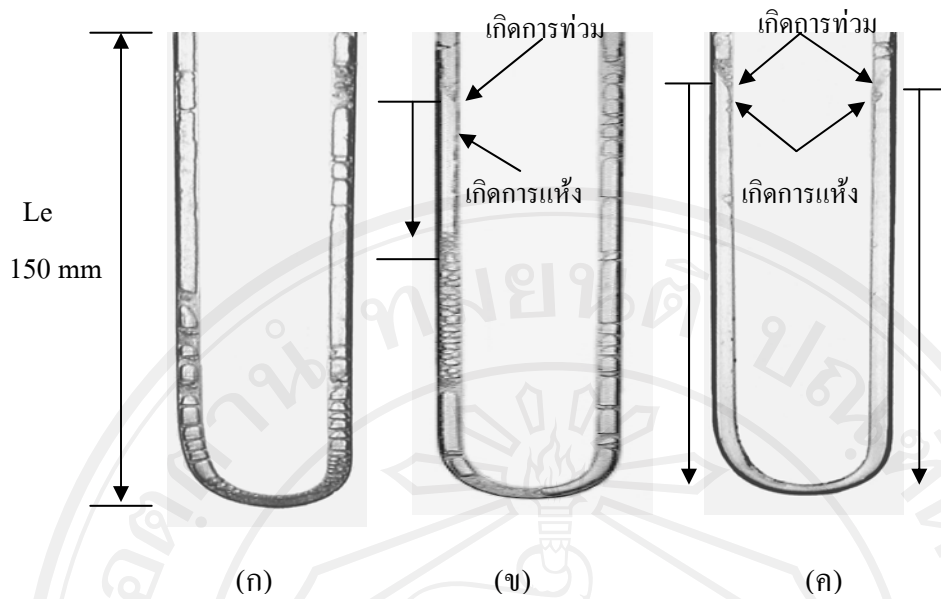
สัดส่วนขนาดนั้นมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนขนาดขึ้น รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤตจะเปลี่ยนจากการไหลแบบโปรงเป็นแบบวงแหวน จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มสัดส่วนขนาดจาก 25 เป็น 75 รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น (นภาพร, 2547) ดังรูปที่ 1.10 และรูปที่ 1.11



รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	105	Slug	9.75	0.065	34.0
ข	120	Slug+Churn	10.48	0.125	11.0
ค	175	Churn	9.67	-	-

รูปที่ 1.10 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด จำนวน 2 โคน้ำ

สัดส่วนขนาดเท่ากับ 25 แสดงเฉพาะ โคน้ำที่ 1 (นภาพร, 2547)



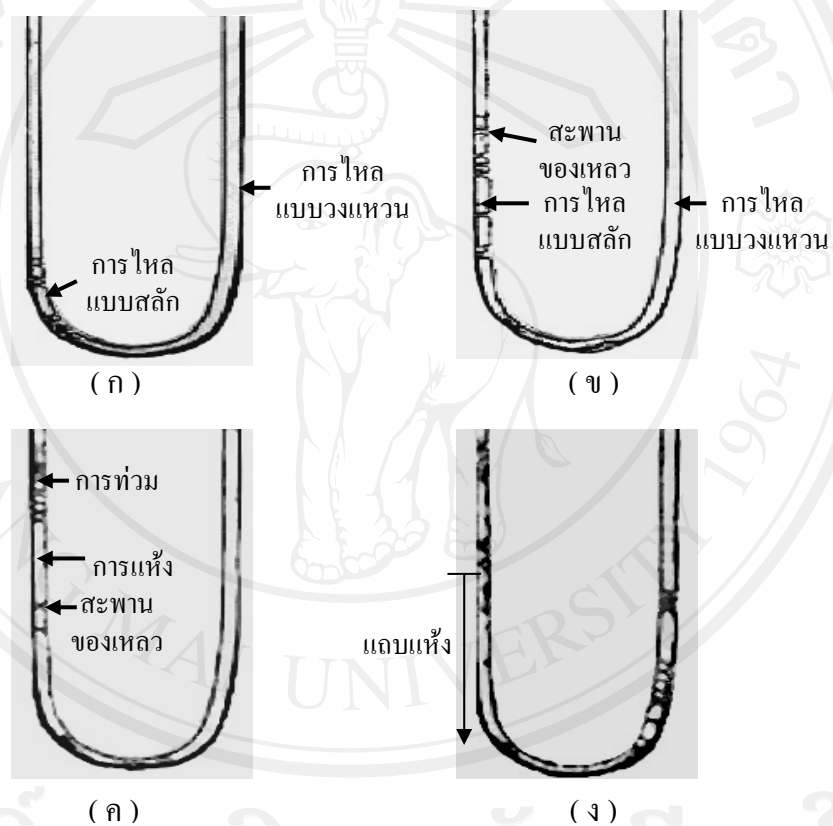
รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W / m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	92	Slug	3.24	0.177	29.9
ข	100	Slug+Annular	3.60	0.375	18.7
ค	119	Annular	2.88	-	-

รูปที่ 1.11 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด จำนวน 2 โคง์เดี่ยว  
 สัดส่วนสนทัดเท่ากับ 75 แสดงเฉพาะ โคง์เดี่ยวที่ 1 (นำพร, 2547)



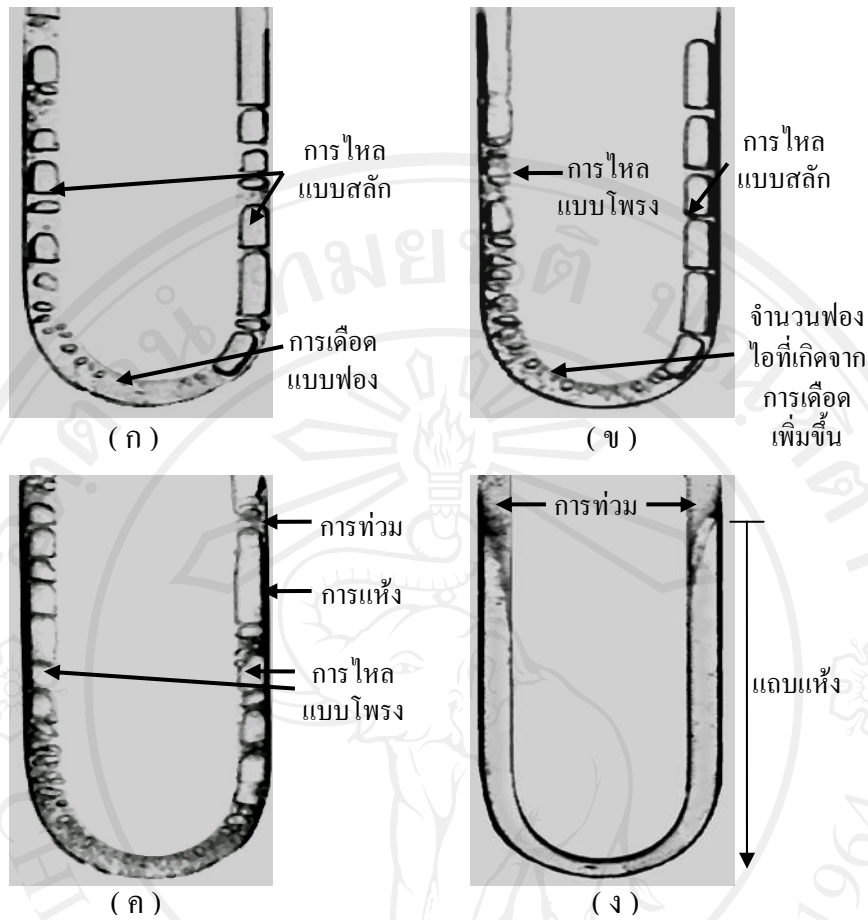
### 1.2.7.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤตจะเปลี่ยนจากการไหลแบบวงแหวนและแบบโพรงเพียงอย่างเดียว โดยใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ R123 และน้ำผสมเอทานอล จากการทดลองท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจาก 1.5 mm เป็น 2 mm ทั้ง 2 ชนิด ของสารทำงาน รูปแบบการไหลได้สอดคล้องกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น (อนูรัตน์, 2547) ซึ่งแสดงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในรูปที่ 1.12 และรูปที่ 1.13 ตามลำดับ



รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	100	Annular+Slug	8.56	0.088	15.6
ข	130	Annular+Slug/Churn	9.03	0.115	10.8
ค	160	Annular+Churn	9.34	-	-
ง	270	-	9.22	-	-

รูปที่ 1.12 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm สารทำงานเป็น R123 (อนูรัตน์, 2547)

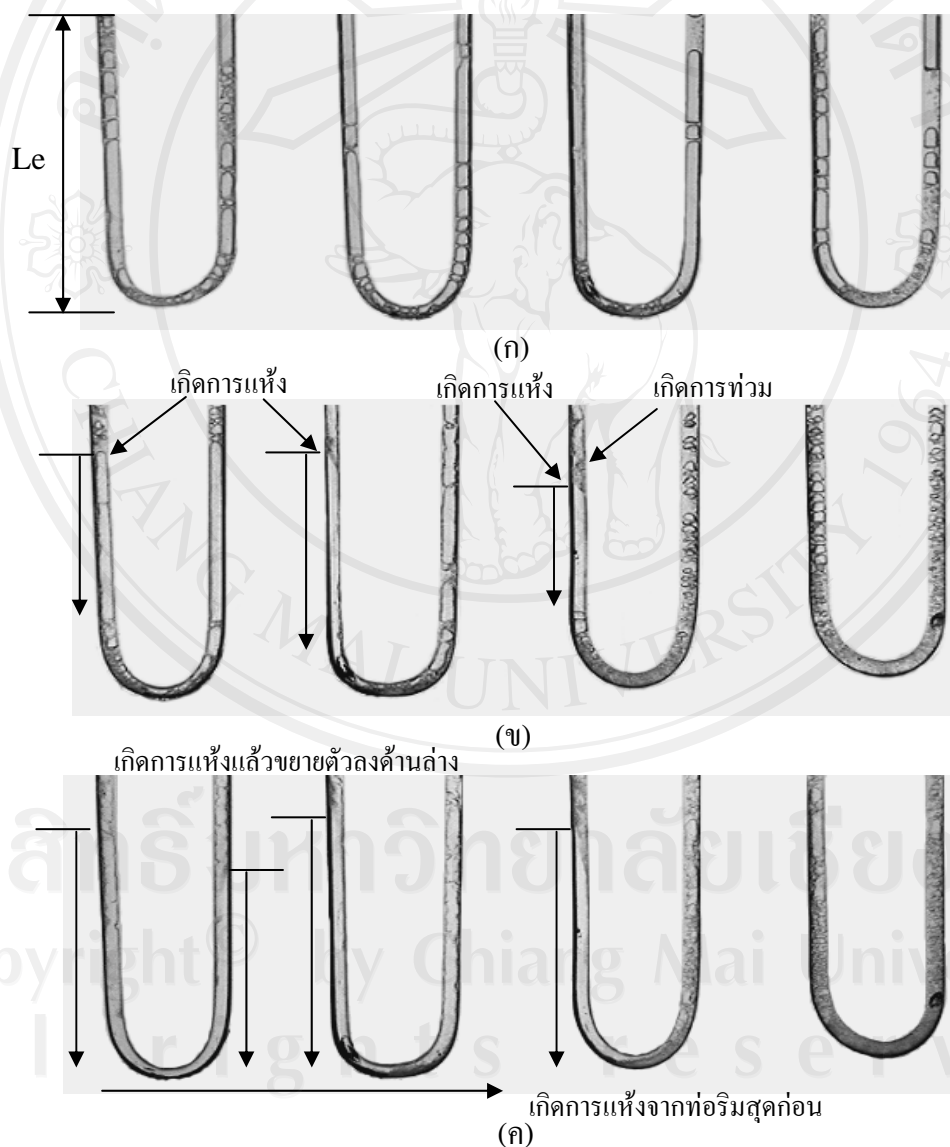


รูป	$T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Flow pattern	$q$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	100	Slug	10.24	0.079	13.2
ข	130	Slug+Churn	11.52	0.108	9.2
ค	200	Churn	11.64	-	-
ง	330	-	10.78	-	-

รูปที่ 1.13 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิตปลายปิด  
ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 mm สารทำงานเป็น R123 (อนุพันธ์, 2547)

### 1.2.7.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

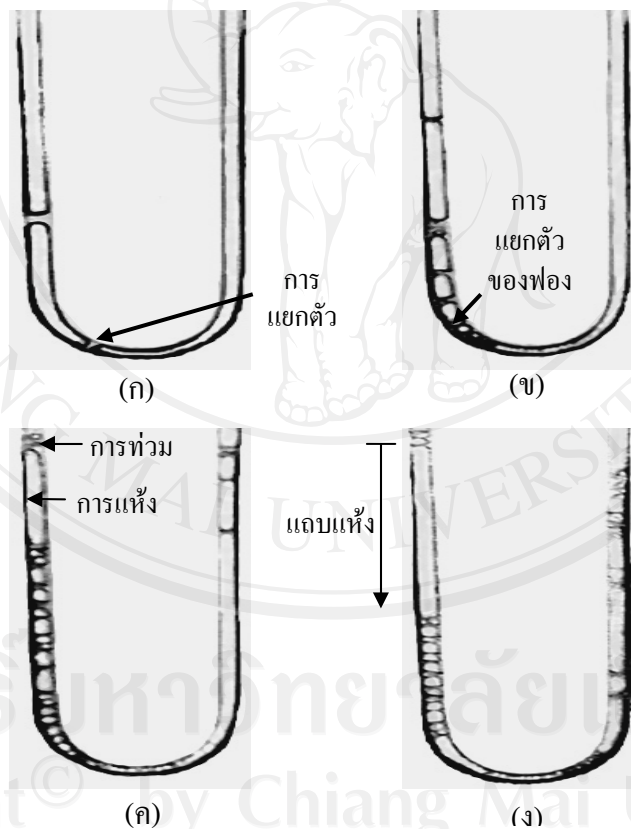
จำนวนโค้งเลี้ยวไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด เนื่องจากในกรณีที่มีความยาวส่วนทำระเหยน้อย เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวมากขึ้น รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤตยังคงเป็นรูปแบบการไหลแบบโพรง ส่วนในกรณีความยาวส่วนทำระเหยมาก จำนวนโค้งเลี้ยวมาก รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤตยังคงเป็นรูปแบบการไหลแบบโพรง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการแห้งของสารทำงานภายในท่อจะเริ่มเกิดจากโค้งเลี้ยวที่อยู่ริมนอกสุดก่อนแล้วค่อยแห้งเข้าสู่ตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 1.14 (นำพร, 2547)



รูปที่ 1.14 ลำดับรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ 10 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm แสดงเฉพาะส่วนทำระเหยโค้งเลี้ยวที่ 1 ถึง 4 (นำพร, 2547)

#### 1.2.7.4 ผลของสารทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

สารทำงานนั้นไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด โดยจากการทดลองเกี่ยวกับสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤต ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1, 1.5 และ 2 mm จำนวน 5 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นมีค่าเท่ากันที่ 50 mm ซึ่งสารทำงานที่ใช้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง R123 กับ สารผสมระหว่างน้ำเอทานอล พบว่ารูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนจากการไหลแบบก่อนเป็นแบบโพรง โดยที่สภาวะวิกฤตไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือยังคงเป็นรูปแบบการไหลแบบก่อนผสมกับแบบโพรง แต่ค่าอัตราความร้อนวิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 mm โดยใช้ R123 และ สารผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลเป็นสารทำงานที่แสดงดังรูปที่ 1.15 และรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.15 รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 mm ใช้สารผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล (อนุพันธ์, 2547)

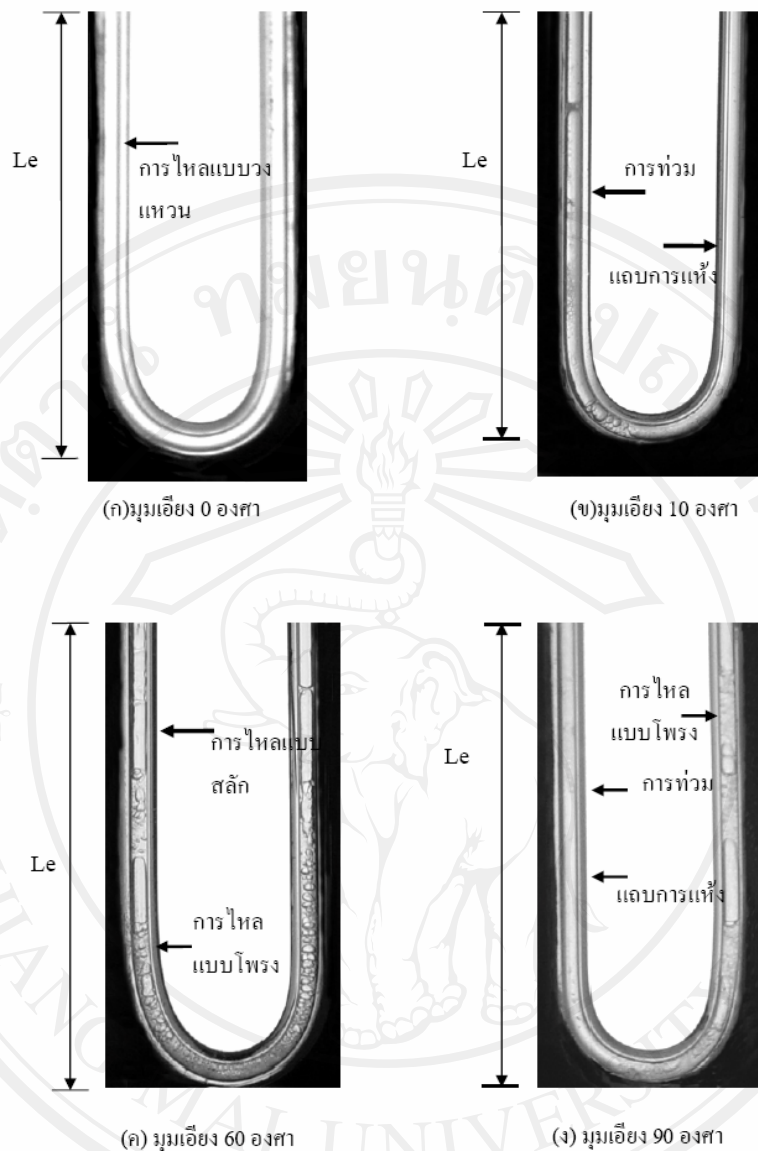
รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	100	Slug	10.65	0.052	28.2
ข	160	Slug+Churn	11.98	0.083	13.8
ค	290	Churn	13.53	-	-
ง	380	-	13.94	-	-

**รูปที่ 1.15** รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 mm ใช้สารผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลเป็นสารทำงาน (อนูรัตน์, 2547) (ต่อ)

#### 1.2.7.5 ผลของมุมเอียงการทำงานของความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

มุมเอียงมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนวิกฤต จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของมุมเอียง ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่สภาวะวิกฤต โดยใช้ท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิดที่ทำจากท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm ขนาดความยาวส่วนที่าระเหยส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่นของท่อมีขนาดเท่ากัน คือ 50 mm โดยใช้สารทำงานเป็น MP39 และ HP 62 เป็นสารทำงานโดยสัดส่วนการเติม 50 % ของปริมาตรทั้งหมด มุมที่ใช้ในการทดสอบคือ 0, 10, 40, 60 และ 90° ซึ่งพบว่าเมื่อมุมเอียงอยู่ที่ 0° ปรากฏการณ์จะเป็นการแห้งแบบฟิล์ม (Film dry out) เมื่อเพิ่มมุมเอียงจาก 0-10° ปรากฏการณ์จะเปลี่ยนจากการแห้งแบบฟิล์มเป็นการท่วม (Flooding) เนื่องจากมีความหนาของฟิล์มที่ด้านบนขึ้น ทำให้ค่าความร้อนวิกฤตค่อยๆ เพิ่มขึ้น หากทำการเพิ่มมุมเอียงขึ้นไปอีกจาก 10-40° ยังคงเป็นปรากฏการณ์การท่วม ค่าความร้อนวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 40-60° พบว่ายังคงเป็นการท่วม แต่เป็นช่วงที่ค่าความร้อนจากความหนาของฟิล์มมาสมดุลกับค่าความร้อนจากการไหลสวนทางของการไหลแบบวงแหวนซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความร้อนวิกฤตมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงขึ้นไปเป็น 60-90° ยังคงเป็นปรากฏการณ์การท่วม รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบแยกชั้นเป็นการไหลแบบสวนทาง ดังนั้นทำให้เกิดการท่วมได้ง่ายขึ้นค่าความร้อนวิกฤตมีค่าลดลง โดยรูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตเมื่อขนาดมุมเอียงที่เปลี่ยนไปนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบวงแหวนและแบบโพรงเป็นการไหลแบบโพรงเพียงอย่างเดียว ซึ่งรูปที่ 1.16 แสดงขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm ที่สภาวะวิกฤต ของสารทำงาน HP62 (สุระ, 2548)





รูปที่ 1.16 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดปลายปิด

ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm ที่สภาวะวิกฤต ของสารทำงาน HP62 (สุระ, 2548)

### 1.2.8 กรณีเชิงคุณภาพของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต

ยังไม่ปรากฏการศึกษาเกี่ยวกับผลของตัวแปรต่าง ๆ ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤต

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.3.1 เพื่อศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบตั้งแต่สภาวะปกติถึงหลังสภาวะวิกฤต

1.3.2 เพื่อศึกษาถึงผลของสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต

1.3.3 เพื่อศึกษาถึงผลของสารทำงานผสมที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรต่างกันที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต

1.3.4 เพื่อศึกษาถึงผลของจำนวนโค้งเกลียวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ได้รับพื้นฐานเกี่ยวกับรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่สภาวะวิกฤตซึ่งประกอบด้วยผลของสารทำงาน สัดส่วนผสมโดยปริมาตรที่ต่างกันและจำนวนโค้งเกลียว

1.4.2 สามารถจำแนกสารทำงานผสมระหว่าง Azeotropic blend และ Non-azeotropic blend ได้

1.4.3 ได้พัฒนาทักษะการใช้อุปกรณ์สำหรับการทดลอง เช่น กล้องถ่ายภาพ กล้องวิดีโอ เป็นต้น

1.4.4 เกิดความชำนาญเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพิ่มเติม คือ Adobe Premiere 6.5 และ Photoshop 8.0

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ตัวแปรควบคุม

- ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบทำมาจากท่อแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.2 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 mm

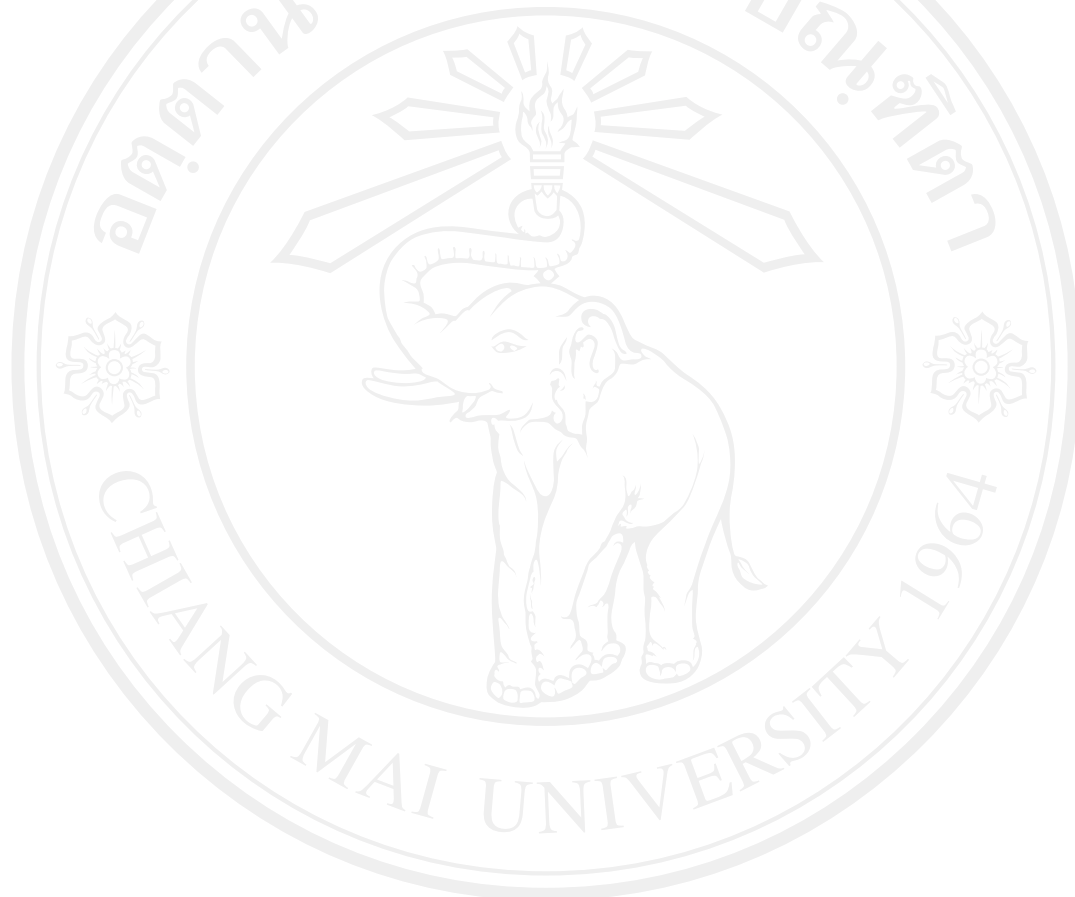
- สัดส่วนการเติมสารทำงานอยู่ในช่วง 50 % โดยปริมาตรทั้งหมดของท่อ

- ตำแหน่งมุมเอียงการทำงานที่ 90° จากแนวระดับ

- ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่นมีค่าเท่ากัน คือ 100 mm

### 1.5.2 ตัวแปรที่ศึกษา

- สารทำงานที่เลือกใช้ในการทดลองนี้เป็นสารทำงานผสมชนิด Azeotropic blend เลือกใช้สารทำงานผสม MP39 และ Non-azeotropic blend เลือกใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b
- สัดส่วนผสมโดยปริมาตรของสารทำงานผสมชนิด Non-azeotropic blend ซึ่งในการทดลองเลือกใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b จำนวนสามค่า คือ 1:1, 1:3 และ 3:1
- จำนวนโค้งเลี้ยวของชุดทดลองมี 2 ค่า คือ 2 และ 5 โค้งเลี้ยว



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved