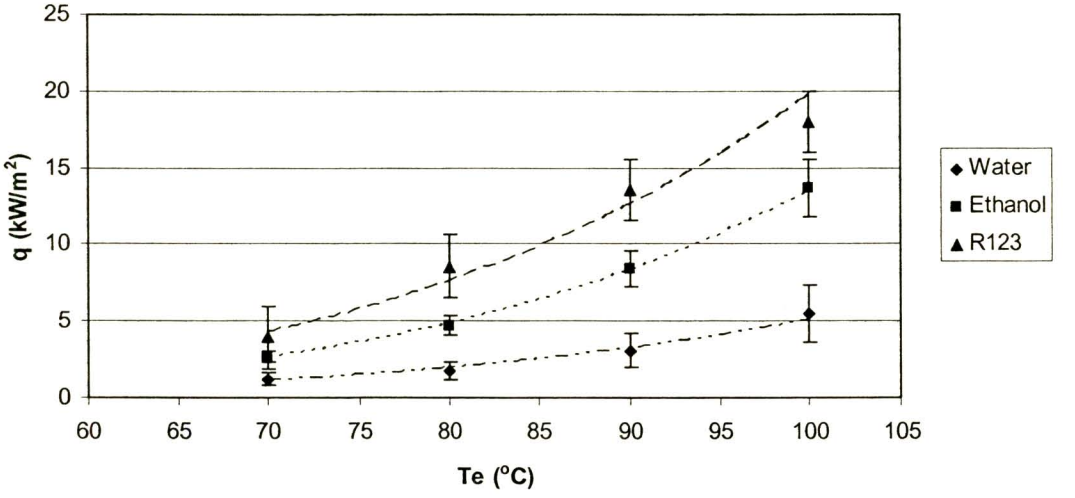
บทที่ 3

ผลการทดลอง

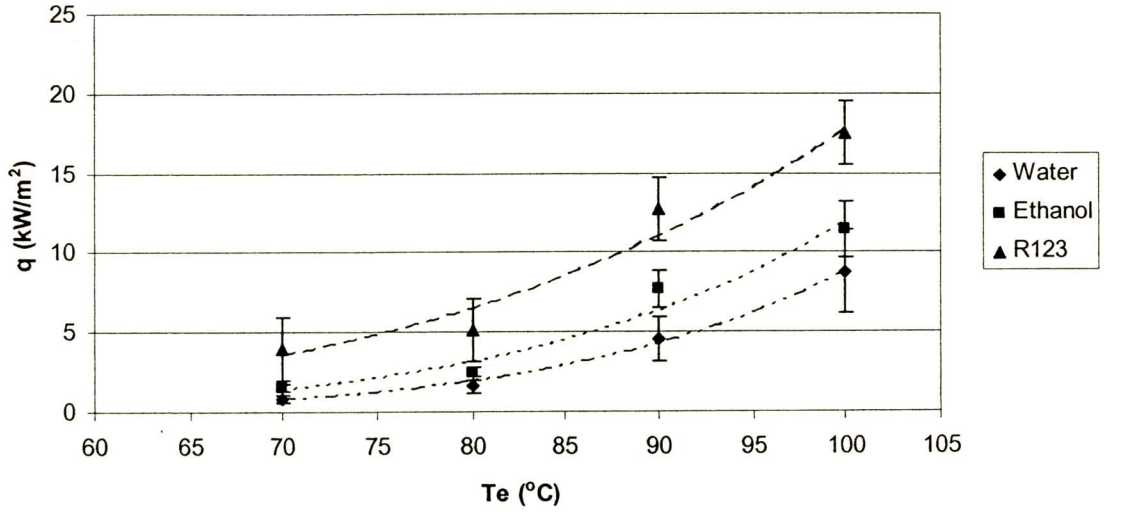
3.1 ผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง ผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ เป็นผลการทดลองจากชุดท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกัน คือ 1.06 และ 2.03 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร ใช้สารทำงานเป็น น้ำ เอธานอล และ R123

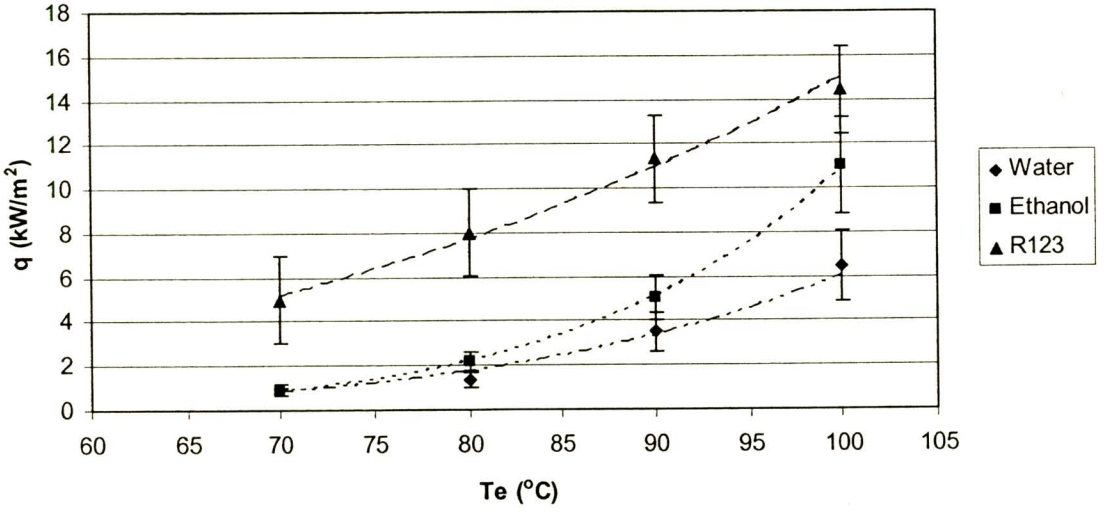
รูปที่ 3.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ 30 โค้งเลี้ยว โดยแกน x แสดงค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหย แกน y แสดงค่า ฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ ในขณะรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงผลการทดลองของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.91 จำนวน 30 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร จำนวน 30 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 30 โค้งเลี้ยว

พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น จาก 70 80 90 จนถึง 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกันท่อเล็กขนาด 1.06 และท่อใหญ่ขนาด 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 30 โค้งเลี้ยว เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยจาก 70 เป็น 100 องศาเซลเซียส ค่าฟลักซ์ความร้อนเมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานจะเพิ่มขึ้นจาก

1,194 เป็น 5,495 W/m^2 ตามลำดับ สำหรับสารทำงานเป็นเอธานอลจะเพิ่มขึ้นจาก 2,701 เป็น 13,670 W/m^2 ตามลำดับ และสารทำงานเป็น R123 จะเพิ่มขึ้นจาก 3,925 เป็น 18,001 W/m^2 ตามลำดับ ซึ่งชุดทดลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร และชุดทดลองที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5 เลี้ยว และ 15 โค้งเลี้ยวที่ใช้ในการทดลองก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

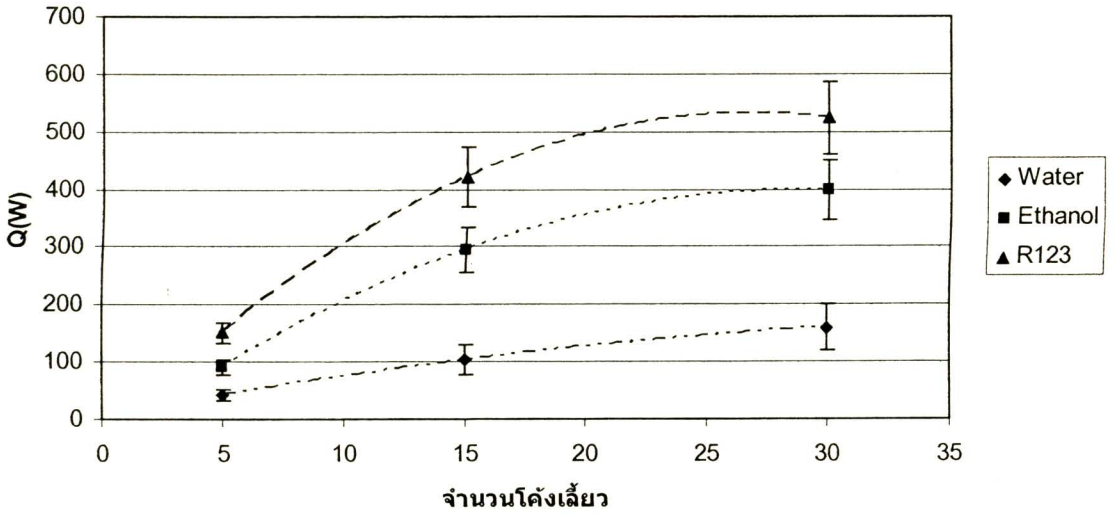
สาเหตุที่ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยเนื่องจาก อุณหภูมิส่วนทำระเหยที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบเดือดได้ง่ายขึ้นจึงสามารถเคลื่อนที่สู่ส่วนควบแน่นได้ง่ายส่งผลให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นอุณหภูมิส่วนทำระเหยเป็นปัจจัยที่ช่วยให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้น

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร กับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกันท่อเล็กขนาด 1.06 และ 2.03 มิลลิเมตรจะส่งถ่ายความร้อนได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้น

3.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีต่อฟลักซ์ความร้อน

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยสูง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลเฉพาะที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C เท่านั้น

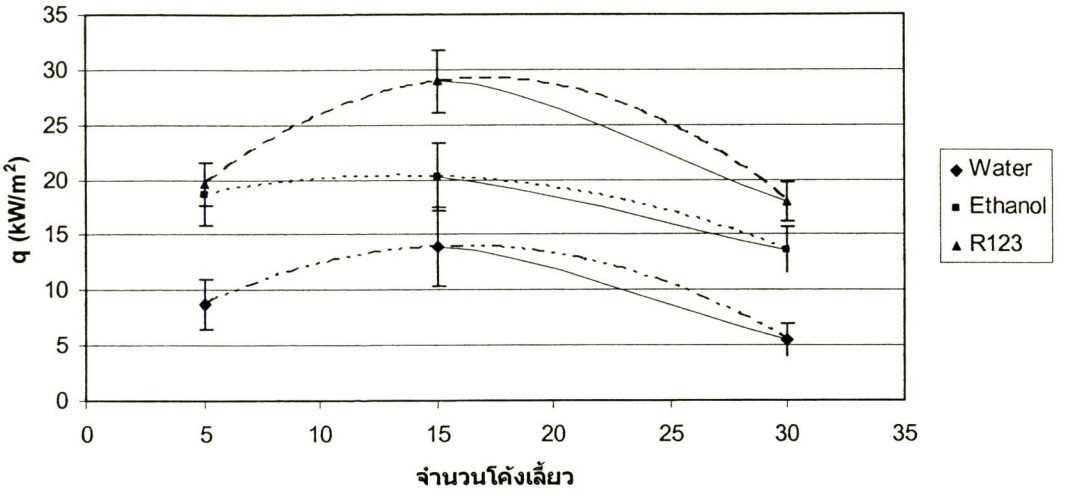
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 โดยแกน x แสดงจำนวนโค้งเลี้ยว ส่วนแกน y แสดงค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อน เพื่อเปรียบเทียบค่าการส่งถ่ายความร้อนที่ได้กับจำนวนโค้งเลี้ยวทั้ง 3 ค่า



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

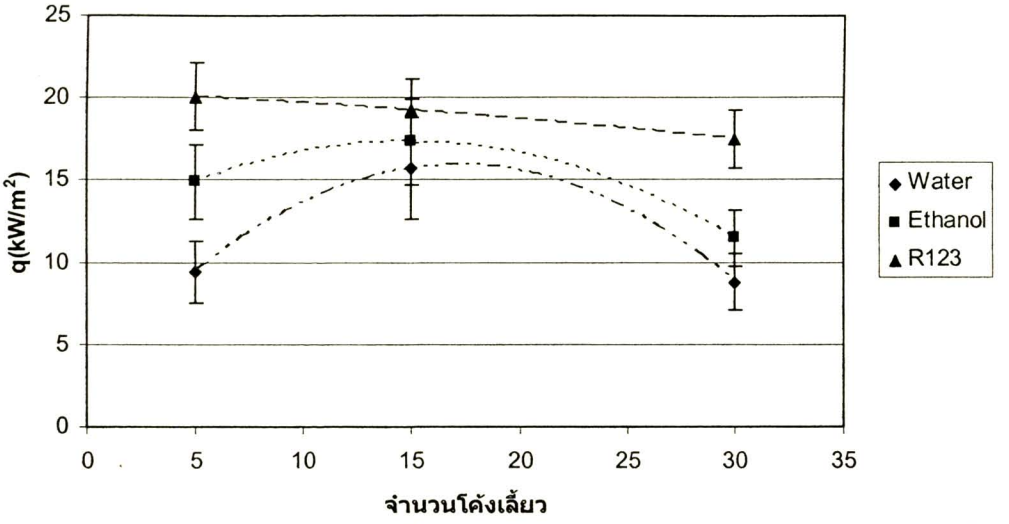
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 โดยแกน x แสดงจำนวนโค้งเลี้ยว ส่วนแกน y แสดงค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อน เพื่อเปรียบเทียบค่าการส่งถ่ายความร้อนที่ได้กับจำนวนโค้งเลี้ยวทั้ง 3 ค่า

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



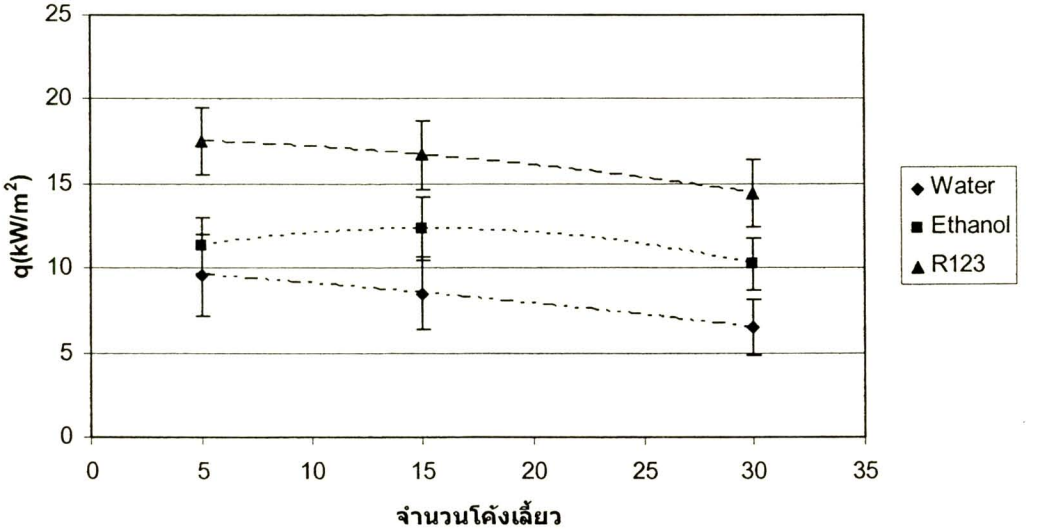
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

ผลที่ได้พบว่าจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบในชุดทดลองทุกชุด เมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวค่าการส่งถ่ายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 แต่เมื่อเปรียบเทียบในเชิงฟลักซ์ความร้อนแล้วพบว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว จะมีค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ 5 และ 30 โค้งเลี้ยว ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สาเหตุที่ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว เนื่องจากความยาวทั้งหมดของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบดังกล่าวมีค่าที่เหมาะสมทำให้ฟองไอของสารทำงานภายในเคลื่อนที่ในระยะทางที่เหมาะสมกว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบจำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยวซึ่งสารทำงานภายในไหลครบ 1 รอบเร็วเกินไป และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบจำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยวซึ่งสารทำงานภายในใช้เวลาไหลนานเพื่อให้สารทำงานภายในไหลครบ 1 รอบ



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

สำหรับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเมื่อใช้เอธานอลและ น้ำ เป็นสารทำงาน ที่จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมากที่สุด ส่วนสารทำงานที่เป็น R123 ที่จำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยว จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมากที่สุด ดังรูปที่ 3.6 จึงสามารถสรุปได้ว่า ท่อความร้อนแบบสั่นที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงที่สุด



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

ในชุดท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร ผลที่ได้พบว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนที่จำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยว ของสารทำงานที่เป็น R123 และ น้ำ ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมากที่สุด ส่วนสารทำงานที่เป็น เอธานอล จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ดีที่สุดที่ 15 โค้งเลี้ยว ดังรูปที่ 3.7

สาเหตุที่ค่าความร้อนที่มีหน่วยเป็นวัตต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อชุดท่อความร้อนมีจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มขึ้นพื้นที่ที่รับความร้อนและระบายความร้อนมีมากขึ้นทำให้มีการรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนได้ดี ทำให้ได้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Charoensawan *et al.* (2003) แล้วพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาเป็นฟลักซ์ความร้อนแล้ว ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 เมื่อมีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 30 โค้งเลี้ยว ส่งผลให้ฟลักซ์ความร้อนมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากสาเหตุการสูญเสียความดันภายในท่อ อันเกิดมาจากท่อความร้อนมีความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีค่าแตกต่างกันจึงเกิดความดันตกคร่อมทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ไม่ดี และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่มากจึงให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้มีค่าลดลง

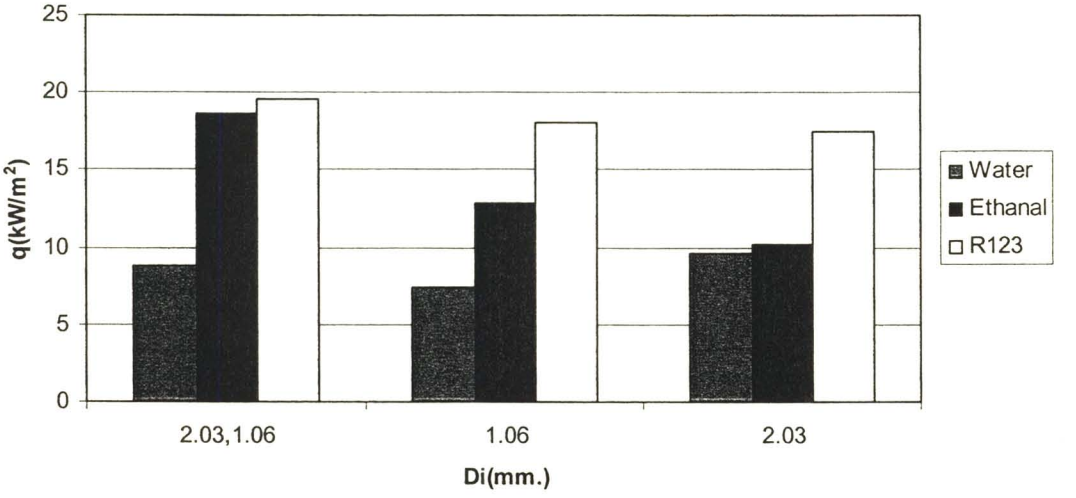
จากผลการทดลองสรุปได้ว่า จำนวนโค้งเลี้ยวในการทดลองนี้มีผลต่ออัตราการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ โดยที่ จำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยว จะส่งถ่ายความร้อนได้มากที่สุด รองลงมาคือ 15 และ 5 โค้งเลี้ยว ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบในเชิงฟลักซ์ความร้อนแล้วพบว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 จำนวน 15 โค้งเลี้ยว ให้ฟลักซ์ความร้อนได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น 5 โค้งเลี้ยว และ 30 โค้งเลี้ยว ตามลำดับ ส่วนในชุดท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่โดยรวมแล้ว ที่จำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยว จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำสุด

3.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีต่อฟลักซ์ความร้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 องศาเซลเซียส ของสารทำงานทั้ง 3 สาร โดยจะแสดงผลที่ได้เป็นแผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อน ซึ่งแกนนอนเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เริ่มจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่แตกต่างกันคือ 1.06 และ 2.03 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2 ขนาดคือ 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนแกนตั้งแสดงค่าฟลักซ์ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมีผลต่อฟลักซ์ความร้อนดังนี้

3.3.1 ท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยว

ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงที่สุด รองลงมา คือท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อใช้เอธานอลและ R123 เป็นสารทำงาน แต่ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 2.03 มิลลิเมตรจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนดีที่สุด รองลงมาเป็นท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกัน และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

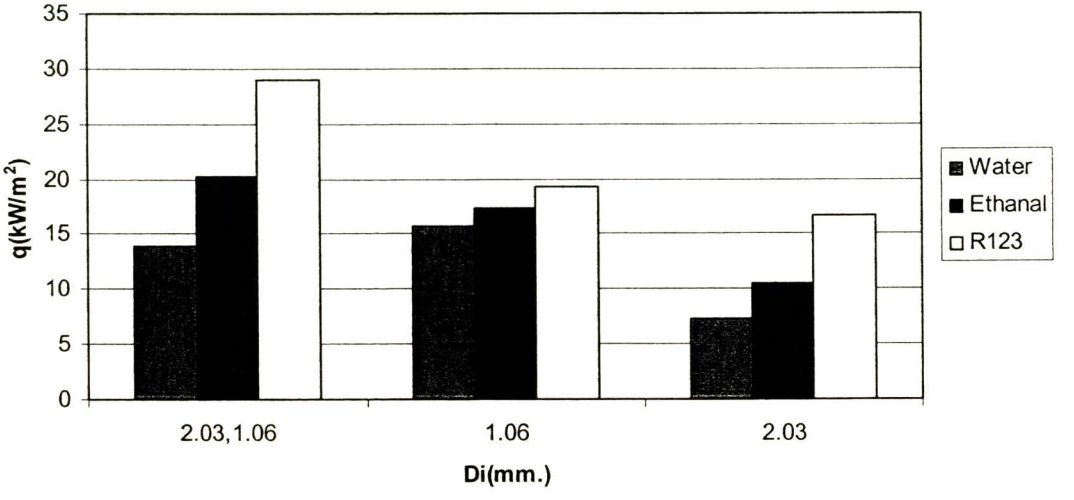


รูปที่ 3.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อน จำนวน 5 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานที่ให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน จึงทำให้มีการส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ในทางกลับกันท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกันนั้น จะส่งถ่ายความร้อนไม่ดีถ้าเลือกสารทำงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมากๆ เนื่องจากการไหลเวียนเป็นไปได้ยาก

3.3.2 ท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว

ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมากที่สุด รองลงมา คือท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อใช้เอธานอลและ R123 เป็นสารทำงาน แต่ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 1.06 มิลลิเมตรจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนดีที่สุด รองลงมาเป็นท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกัน และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.9

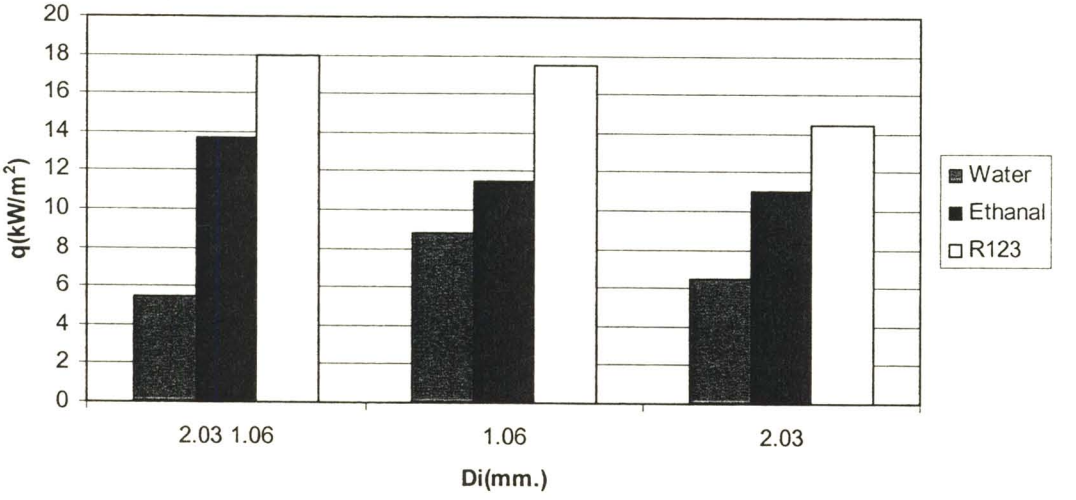


รูปที่ 3.9 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อน จำนวน 15 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานที่ให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน จึงทำให้มีการส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ในทางกลับกันท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกันนั้น จะส่งถ่ายความร้อนไม่ดีถ้าเลือกสารทำงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมากๆ เช่นเดียวกับในกรณี 5 โค้งเลี้ยว

3.3.3 ท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยว

ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมากที่สุด รองลงมา คือท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อใช้เอธานอลและ R123 เป็นสารทำงาน แต่ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ขนาด 1.06 มิลลิเมตรจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนดีที่สุด รองลงมาเป็นท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกัน และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อน จำนวน 30 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานที่ให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน จึงทำให้มีการส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ในทางกลับกันท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสลับกันนั้น จะส่งถ่าย

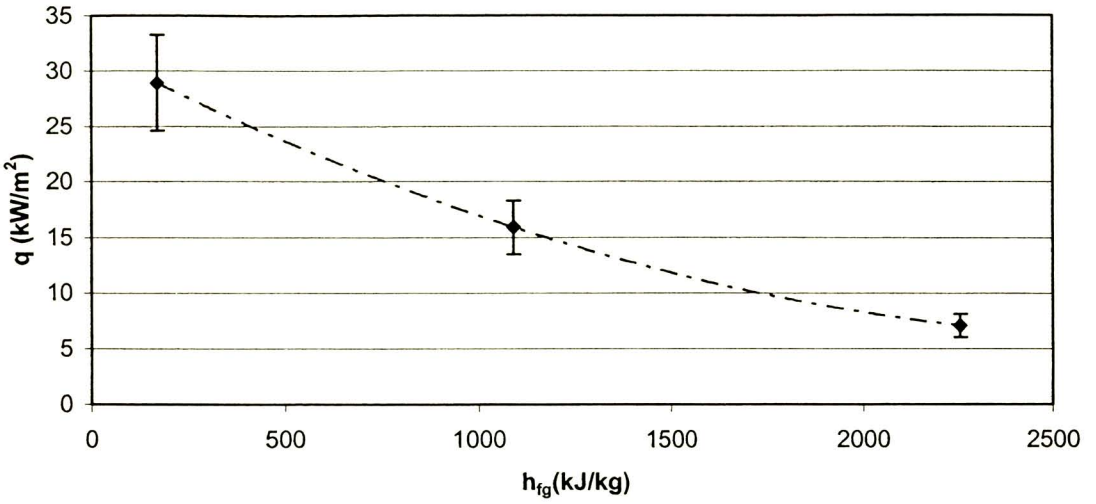
ความร้อนไม่ดีถ้าเลือกสารทำงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมากๆ เช่นเดียวกับในกรณี 5 และ 15 โค้งเลี้ยว

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมีผลต่อค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อน โดยสังเกตได้ว่าเมื่อใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแตกต่าง 2.03, 1.06 มิลลิเมตร ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะดีกว่าท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ ซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว คือสารทำงานเมื่อได้รับความร้อนเกิดการระเหยขึ้นไปในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์ภายในขนาดใหญ่ เพราะไหลเวียนได้สะดวกกว่า แล้วควบแน่นไหลกลับลงส่วนทำระเหยที่ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก สารทำงานภายในจึงเกิดการไหลเวียนในทิศทางเดียว

3.4 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อน

ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว เนื่องจากความยาวทั้งหมดของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบดังกล่าวมีค่าที่เหมาะสมทำให้ฟองไอของสารทำงานภายในเคลื่อนที่ในระยะทางที่เหมาะสมกว่าท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบจำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยวซึ่งสารทำงานภายในไหลครบ 1 รอบเร็วเกินไป และท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบจำนวนโค้งเลี้ยว 30 โค้งเลี้ยวซึ่งสารทำงานภายในใช้เวลาไหลนานเกินไป

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสารทำงานที่อยู่ภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ น้ำ เอธานอล และ R123 ซึ่งจะนำมาบรรจุลงในชุดท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลอง โดยเติมที่ 50% โดยปริมาตรทั้งหมด ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้ จะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของสารทำงานที่เกิดขึ้น ดังนี้



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C ของ ที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.91 จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว

รูปที่ 3.11 แสดงผลของสารทำงานที่มีต่อการส่งถ่ายความร้อน จะสังเกตเห็นได้ว่าสารทำงานที่เป็น R123 ซึ่งเป็นสารที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้อยที่สุดจะให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่สุด รองลงมาจะเป็น เอธานอล และ น้ำ ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้นี้เกิดขึ้นในชุดท่อความร้อนทุกชุดที่ใช้ในการทดลอง

สาเหตุที่สารทำงานให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่แตกต่างกันเกิดจาก สารทำงานแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองนี้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนที่แตกต่างกันเกิดจากค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยสารที่สามารถระเหยได้ง่ายจะสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีกว่าสารที่ระเหยได้ยากเนื่องจากว่าเมื่อท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบได้รับความร้อน สารทำงานที่ระเหยง่ายจะมีการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานจากของเหลวและกลายเป็นฟองไอได้เร็วจึงทำให้ความถี่ในการกลายเป็นฟองไอมีมากขึ้นทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบนี้ส่งถ่ายความร้อนได้มาก ในการทดลองนี้ R123 จึงส่งถ่ายความร้อนได้มากกว่าสารทำงานที่เป็น น้ำ และเอธานอล

จากการทดลองนี้สามารถสรุปผลได้ว่า สารที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงๆ จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองนี้ที่ใช้สารทำงาน R123 สามารถให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนที่ดีที่สุด รองลงมาคือ น้ำ และ เอธานอล ตามลำดับ

3.5 ผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง

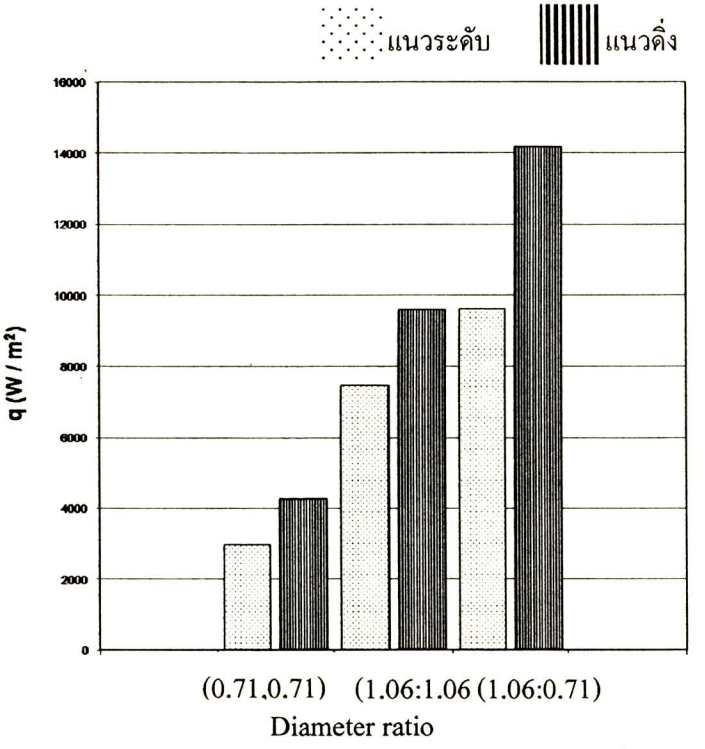
รูปที่ 3.12 แสดงผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีต่อค่าการส่งถ่ายความร้อน โดยแกน x แสดงค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง และแกน y แสดงค่าฟลักซ์ความร้อน ท่อความร้อนปรกติที่มี

เส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ (0.71 mm) และ (1.06 mm) เปรียบเทียบกับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่มีค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 (1.06: 0.71 mm) ทั้งในแนวระดับและแนวดิ่ง

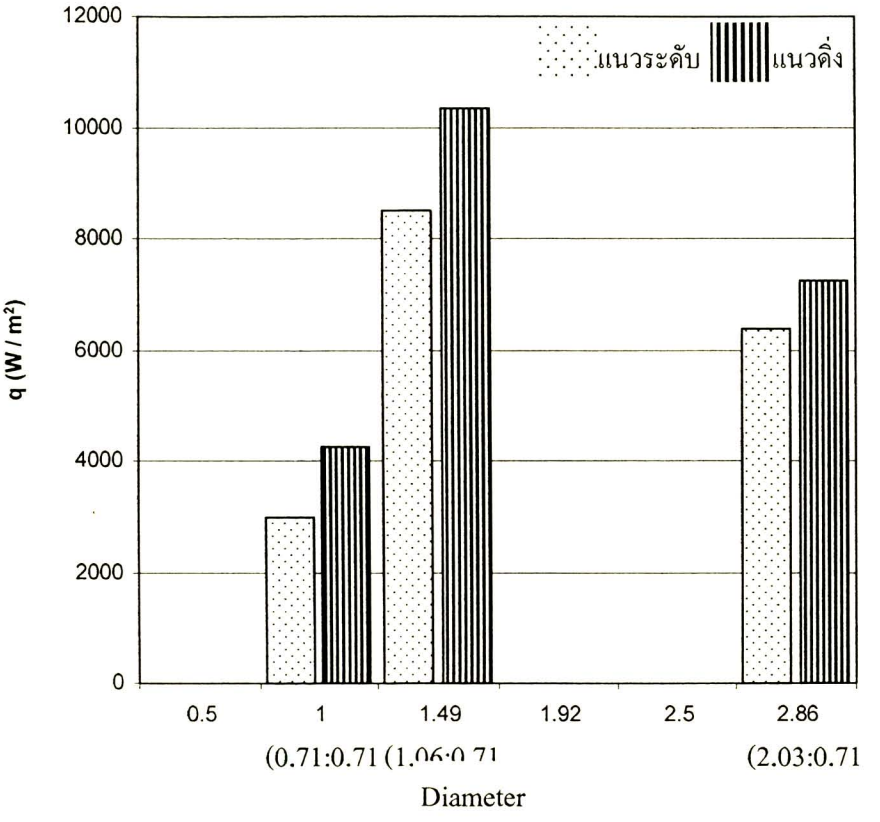
พบว่าท่อที่มีค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 0.71 mm และ 1.06 mm ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร สารทำงานเป็น R123 จำนวน 15 โค้ง เลี้ยวจะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 ที่ให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สูงทั้งในแนวระดับและแนวดิ่ง เนื่องมาจากลักษณะของท่อที่มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ มีส่วนช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานภายในทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมีค่าสูงกว่าท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงกว่าท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่

รูปที่ 3.13 พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.71 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร สารทำงานเป็น R123 จำนวน 15 โค้งเลี้ยว ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสัดส่วนการเติมที่เหมาะสมที่สุด เมื่อนำมาเปรียบเทียบการส่งถ่ายความร้อนกับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ (1.06mm: 0.71 mm และ 2.03 mm: 0.71 mm) ที่สัดส่วนการเติมเดียวกัน พบว่า สามารถเพิ่มค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นให้สูงขึ้นได้โดยการออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ โดยเมื่อค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 1 ไปเป็น 1.49 และ 2.85 จะมีค่าฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4,270 เป็น 14,178 และ 7,290 W/m^2 ตามลำดับ เมื่อทำงานในแนวดิ่ง



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 0.71 และ 1.06 มิลลิเมตร กับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่มีค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123

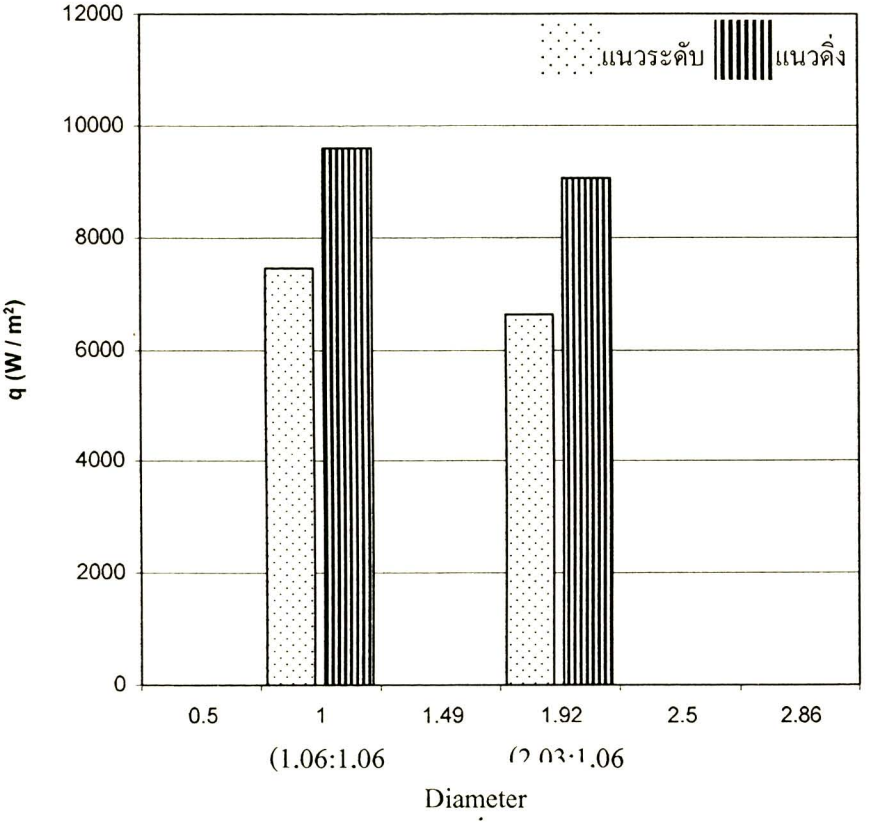


รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 0.71 มิลลิเมตรกับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.14 จะเป็นกราฟที่มีแกน X เป็นค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางและแกน Y เป็นค่าฟลักซ์ความร้อน โดยจะเปรียบเทียบทั้งในแนวระดับและแนวดิ่งระหว่างท่อความร้อนปรกติที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ (1.06 mm) กับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 3.14 พบว่าที่ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.06 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร สารทำงานเป็น R123 จำนวน 15 โค้งเลี้ยวที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ (2.03 mm: 1.06 mm) ที่สัดส่วนการเติมเดียวกันทำให้ท่อขนาด 1.06 มิลลิเมตรจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงกว่าท่อที่มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ โดยเมื่อค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 1 ไปเป็น 1.92 จะมีค่าฟลักซ์ความร้อนลดลงจาก 10,420 เป็น 9,590W/m^2 เมื่อวางตัวในแนวดิ่ง แต่เมื่อพิจารณาในแง่อัตราการส่งถ่ายความร้อน พบว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่จะมีค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนน้อยกว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอโดยเพิ่มขึ้นจาก 88.64 เป็น 126.68 W อีกทั้งเมื่อพิจารณาท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ที่สัดส่วนการ

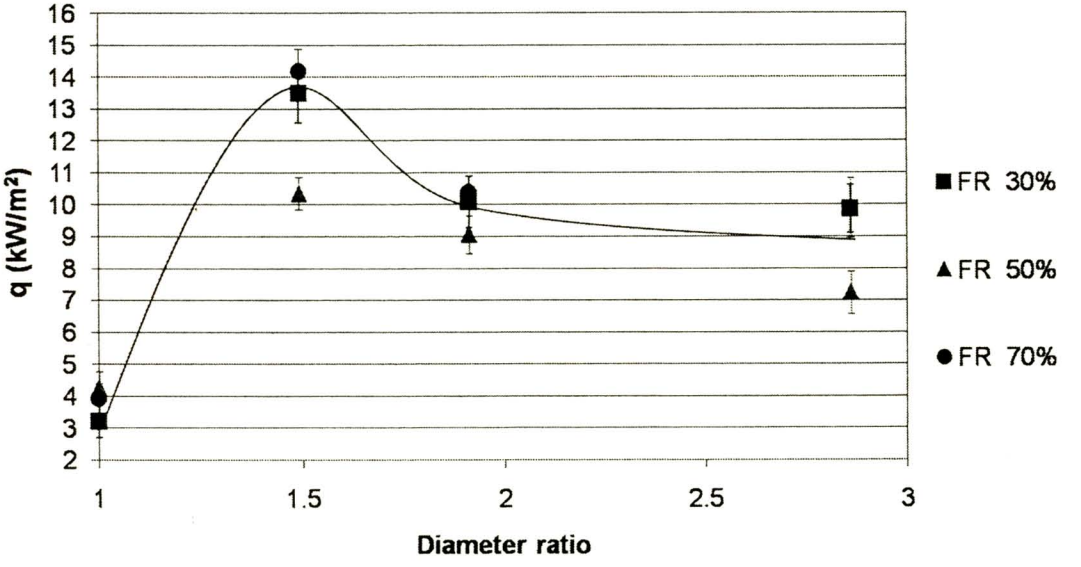
เติมสารทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์นั้นพบว่าจะให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนและค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงกว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ในทุกๆ ชุดการทดลอง เนื่องจากเป็นสัดส่วนการเติมที่ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงที่สุด



รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตรกับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 3.15 จะเป็นกราฟที่มีแกน x เป็นค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางและแกน y เป็นค่าฟลักซ์ความร้อนของแต่ละสัดส่วนการเติมที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 และมุมการทำงาน 90 องศาจากแนวระดับ โดยข้อมูลในแต่ละจุดจะแสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานด้วย พบว่าที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงที่สุดในทุกสัดส่วนการเติมสารทำงาน เส้นแนวโน้มแสดงให้เห็นว่า ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนสูงกว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่โดยแนวโน้มจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกสัดส่วนการเติมสารทำงาน นั่นคือเมื่อสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนที่ลดลง เนื่องมาจากท่อที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อย หมายถึงความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดใหญ่และเล็กนั้นน้อยมาก มีผลทำให้การไหลของสารทำงานภายในมีความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่น้อยดังนั้นจึงทำให้การส่งถ่าย

ความร้อนนั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในทางตรงกันข้ามจะพบว่าที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากขึ้นแสดงถึงความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดใหญ่และเล็กนั้นมาก ทำให้การไหลของสารทำงานภายในนั้นเกิดความดันตกคร่อมที่สูง ของไหลเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นความเร็วในการไหลเวียนลดต่ำลง ของไหลจึงไปส่งถ่ายความร้อนได้น้อยลง ซึ่งมีผลทำให้การส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนนั้นลดลงอีกด้วย

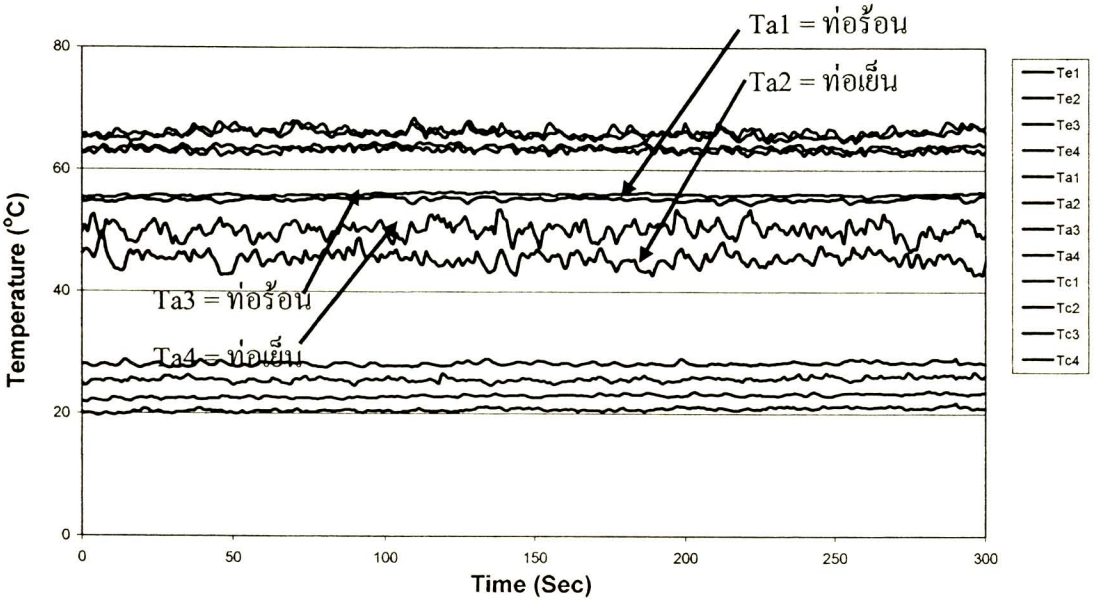


รูปที่ 3.15 ผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 มุมการทำงาน 90 องศาจากแนวระดับ

ท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอนั้น มีผลทำให้สารทำงานภายในนั้นเกิดการไหลเวียนไปในทิศทางเดียว ซึ่งช่วยให้สารทำงานสามารถส่งถ่ายความร้อนจากส่วนทำระเหยไปสู่ส่วนควบแน่นได้ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าการไหลภายในนั้นจะแยกเป็นท่อที่มีอุณหภูมิสูงและท่อที่มีอุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งแกน x แสดงค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง และแกน y แสดงค่าฟลักซ์ความร้อน ที่ชุดการทดลองที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.86 (2.03 mm: 0.71 mm) ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 สัดส่วนการเติมสารทำงาน 30 เปอร์เซ็นต์ มุมการทำงาน 90 องศาจากแนวระดับจะเห็นว่า ที่สภาวะคงตัวของท่อความร้อนแบบสั่น สารทำงานจะรับความร้อนและกลายเป็นไอระเหยขึ้นไปในท่อที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากไอร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนในท่อใหญ่นั้นได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเล็กทำให้มีอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าสูง จึงเรียกว่า "ท่อร้อน" และเนื่องจากผลของความเฉื่อยนั้นสารทำงานจะถูกควบแน่นแล้วไหลกลับลงมาที่ท่อที่มีขนาดเล็กกลับไปสู่ส่วนทำระเหยอีกครั้งหนึ่งทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าต่ำ จึงเรียกว่า "ท่อเย็น" ดังรูปที่ 3.16 ดังนั้นจะทำให้การส่งถ่ายความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเหมือนกับผลการทดลองของ Shi lui *et al.* (2007) แต่การไหลเวียนของสาร

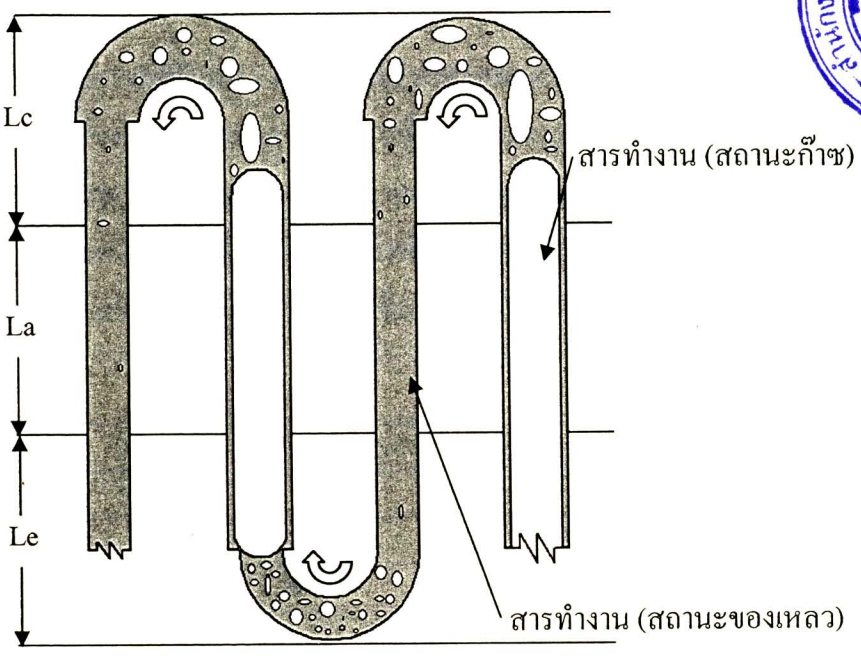
ทำงานภายในนั้นจะพบในกรณีที่สารทำงานเป็น R123 เท่านั้น เนื่องมาจากสารทำงาน R123 มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่ต่ำ ทำให้เกิดการเดือดและกลายเป็นไอได้ดีเมื่อเทียบกับสารทำงานน้ำ และ เอธานอล ที่สารทำงานภายในไม่เกิดการไหลเวียนแต่จะเกิดการสั่นของสารทำงานแทน

ดังนั้นจะเห็นว่าที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงที่สุดและจะลดลงเมื่อค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น อีกทั้งหากต้องการปรับปรุงลักษณะของท่อความร้อนแบบสั่นให้มีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดนั้น จะต้องพิจารณาผลของสัด ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่จะนำมาใช้ร่วมด้วย นั่นคือจะต้องมีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำให้ขนาดของท่อใหญ่และท่อเล็กมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งจะสามารถทำให้ท่อความร้อนที่ปรับปรุงลักษณะนั้นมีค่าฟลักซ์ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 3.16 อุณหภูมิที่วัดได้ของสารทำงานภายในที่ส่วนกันความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น

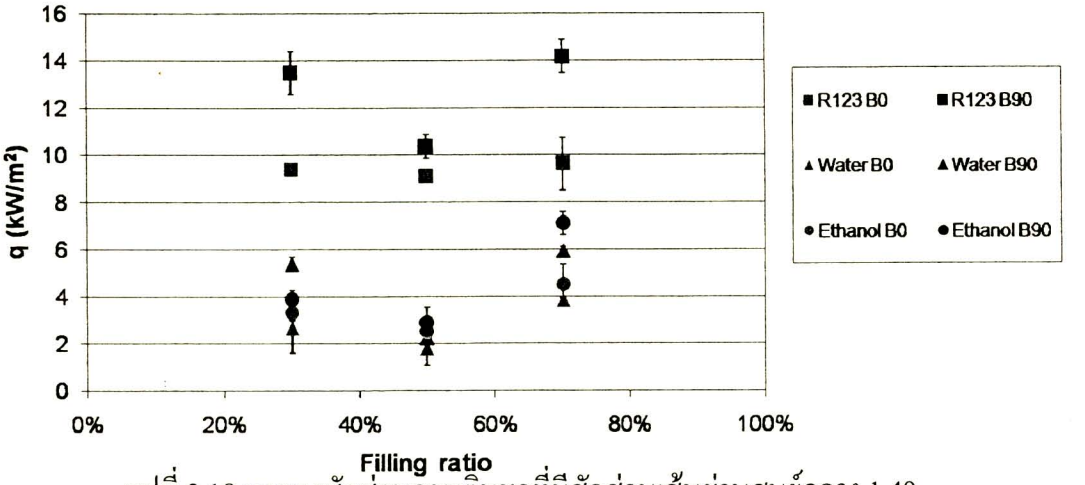
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



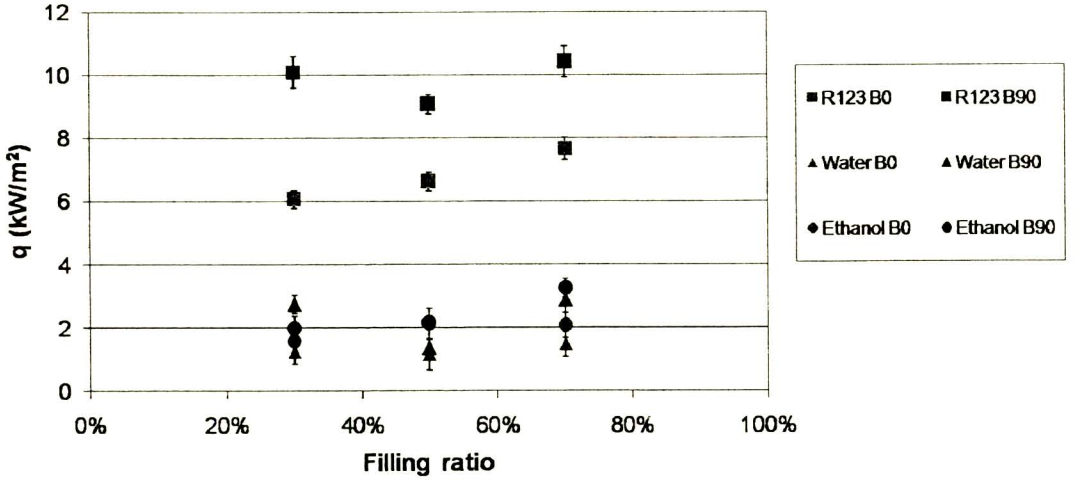
รูปที่ 3.17 ลักษณะของการไหลเวียนของสารทำงานภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ

3.6 ผลของสัดส่วนการเติมสารทำงาน

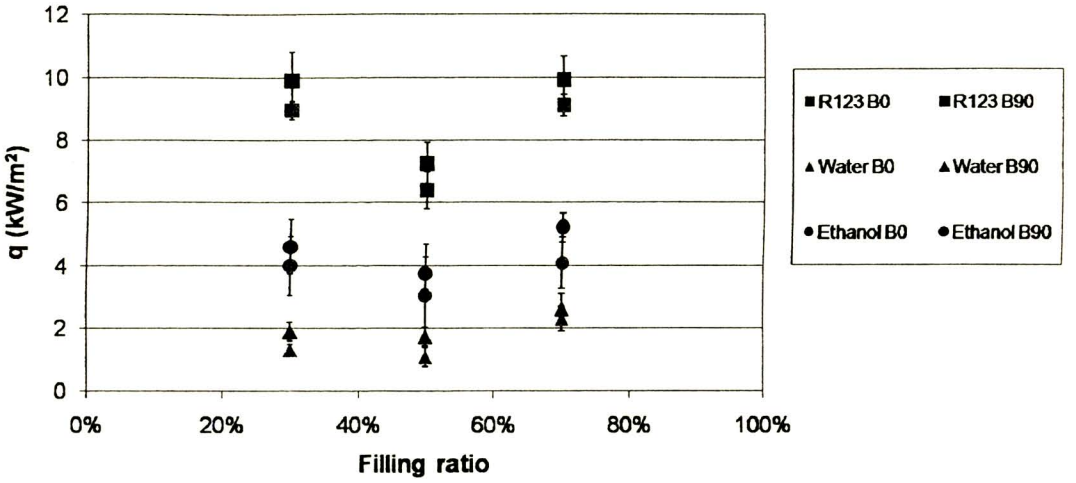
รูปที่ 3.18 จะเป็นกราฟที่มีแกน x เป็นค่าสัดส่วนการเติมสารทำงานและแกน y เป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 รูปที่ 3.19 และ รูปที่ 3.20 เป็นกราฟแสดงผลของสัดส่วนการเติมที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.92 และ 2.86 ตามลำดับ พบว่า ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดจะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำที่สุดโดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49



รูปที่ 3.19 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.92



รูปที่ 3.20 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.86

แนวโน้มของสัดส่วนการเติมสารทำงานสำหรับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอนี้ จะแตกต่างจากท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ที่จะมีค่าสัดส่วนการเติมที่ดีที่สุดในการส่งถ่ายความร้อนอยู่ที่ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเหตุผลก็เนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 ขนาด ซึ่งประกอบด้วยท่อขนาดเล็กและใหญ่จัดเรียงสลับกัน ซึ่งที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ นั้น ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำที่สุด เนื่องมาจากการไหลของสารทำงานภายในเมื่อไหลภายในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอนั้นจะต้องไหลผ่านส่วนที่ท่อเปลี่ยนขนาดจากท่อเล็กไปท่อใหญ่อย่างฉับพลัน (Sudden contraction) ซึ่งที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์นี้จะมีสารทำงานภายในเป็นสถานะก๊าซและของเหลวผสมกันอยู่ทำให้การไหลผ่านส่วน Sudden contraction นั้นทำได้ยากเนื่องจากมีผลของแรงตึงผิวระหว่างทั้งสองสถานะและเกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่สูงทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแตกต่างกันจะมีผลต่อค่าอัตรา ส่วนการเติมและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนอีกด้วย

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 30 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าสารทำงานสถานะก๊าซมีปริมาณจำนวนมาก ทำให้สามารถไหลเวียนไปสู่ส่วนควบแน่นและผ่านส่วน Sudden contraction ได้อย่างรวดเร็วทำให้ส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้น และในทางตรงกันข้ามที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์พบว่าจะสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่สุด เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากความร้อนสัมผัส (Sensible heat) เนื่องจากสารทำงานส่วนใหญ่เป็นของเหลว และมีผลของแรงตึงผิวระหว่างสองสถานะที่ต่ำทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่ต่ำ มีผลทำให้การส่งถ่ายความร้อนมีค่าสูงที่สุด

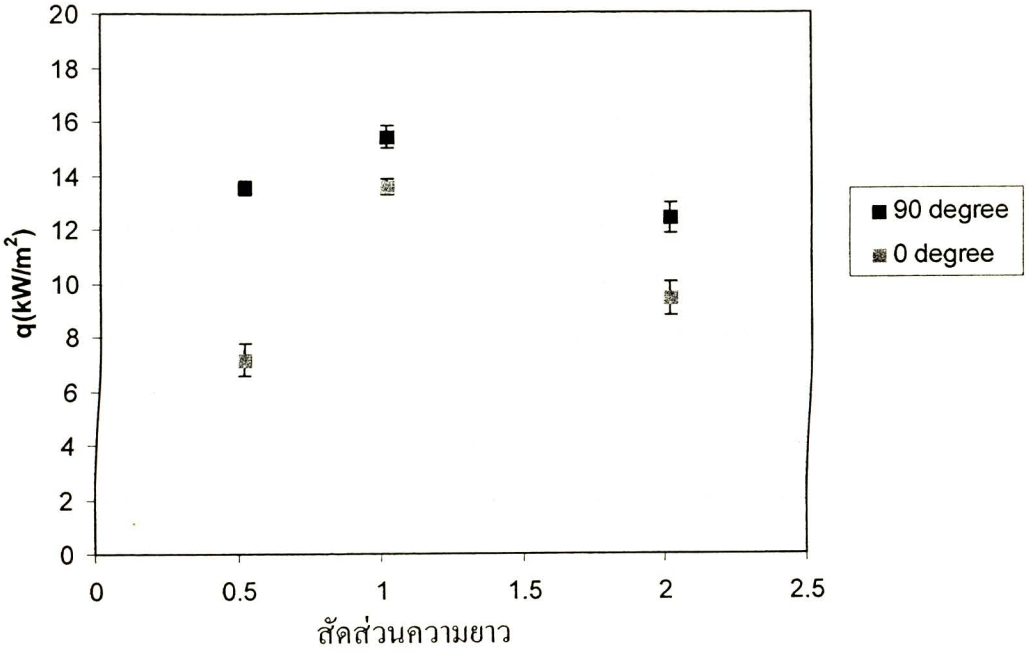
ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำที่สุดโดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการเติมเป็น 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.7 ผลของสัดส่วนความยาว

ในการทดสอบได้แบ่งท่อความร้อนออกเป็น 2 ชุด โดยชุดที่ 1 เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 โดยการเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อโดยที่แต่ละโค้งเลี้ยวยังมีท่อทั้ง 2 ขนาด เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมและนำไปสร้างชุดทดลองชุดที่ 2 เพื่อลดจำนวนจุดเชื่อมต่อลง ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

3.7.1 ชุดที่ 1 การทดสอบหาจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสม

รูปที่ 3.21 แสดงผลของสัดส่วนความยาวต่อค่าการส่งถ่ายความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 พบว่า ที่มุมเอียง 90^{O} ท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 จะให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด มีค่าเท่ากับ 14.94 kW/m^2 และเมื่อค่าสัดส่วนความยาวเปลี่ยนไปเป็น 2 และ 0.5 จะทำให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนลดลง เป็น 12.40 kW/m^2 และ 13.54 kW/m^2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่มุมเอียง 0^{O} ท่อความร้อนแบบสั่นที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 มีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.30 kW/m^2 และเมื่อค่าสัดส่วนความยาวเปลี่ยนไปเป็น 2 และ 0.5 จะทำให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนลดลง เป็น 9.41 kW/m^2 และ 7.14 kW/m^2 ตามลำดับ การที่ท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 ส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่สุดนั้น เนื่องจากมีจุดเชื่อมต่ออยู่ตรงบริเวณโค้งเลี้ยว แต่ท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 2 และ 0.5 จุดเชื่อมต่อจะแยกห่างจากโค้งเลี้ยว ดังนั้นในขณะที่สารทำงานมีการไหลเวียนท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 จะเกิดความดันสูญเสีย (Head loss) เนื่องจากการลดขนาดท่อและข้องอในคราวเดียวซึ่งจะทำให้การไหลเวียนของสารทำงานมีความต่อเนื่องมากกว่าจึงมีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงกว่า



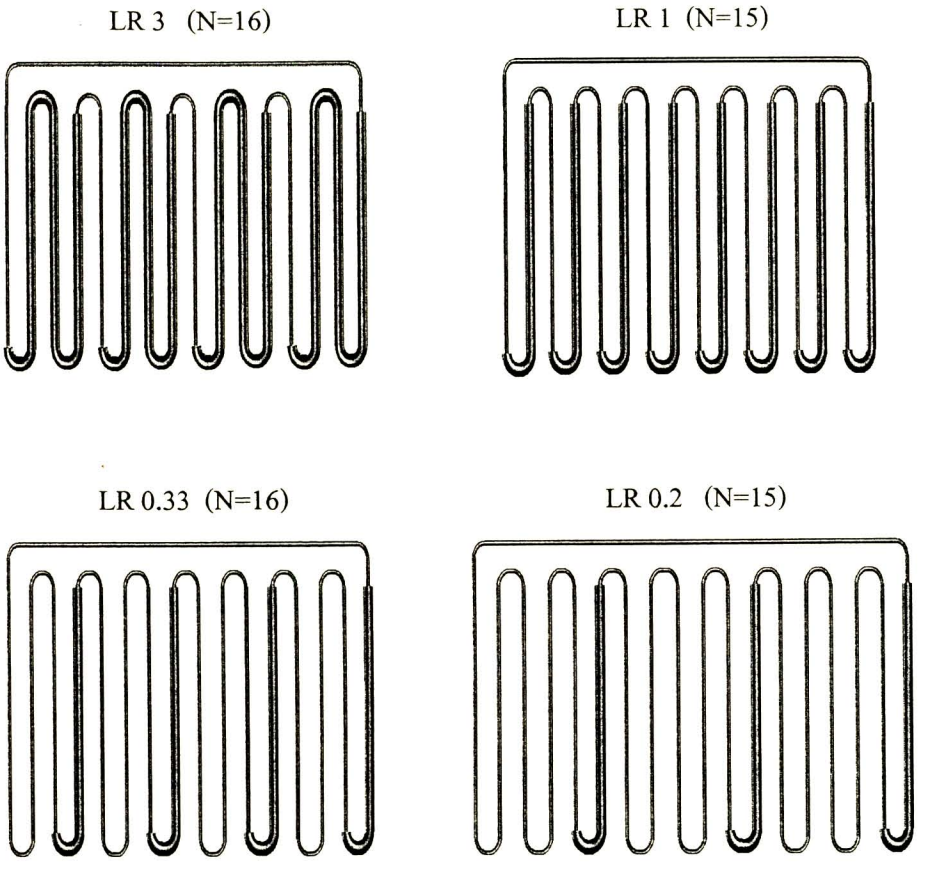
รูปที่ 3.21 ผลของค่าสัดส่วนความยาวต่อค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ที่แต่ละโค้งเลี้ยวมีท่อ 2.03 mm และ 1.06 mm

3.7.2 ชุดที่ 2 การทดสอบการลดจำนวณจุดเชื่อมต่อ

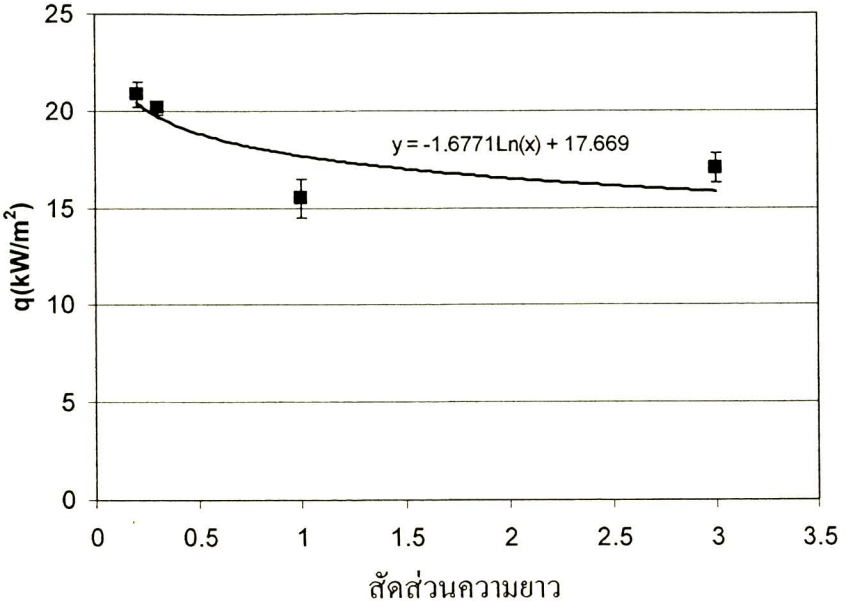
การลดจำนวนจุดเชื่อมต่อโดยการเพิ่มความยาวของท่อแต่ละขนาดทำให้ได้ค่าสัดส่วนความยาวทั้งหมด 4 ค่าซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.22 โดยท่อขนาดเล็กและท่อขนาดใหญ่แต่ละคู่ของแต่ละสัดส่วนจะเชื่อมต่อกันจนครบเป็นวงรอบ

เมื่อทำการทดสอบพบว่า ท่อความร้อนทุกสัดส่วนความยาวยังคงมีการไหลเวียนของสารทำงานในทิศทางเดียวและแบ่งเป็นท่อร้อนและท่อเย็น และเมื่อทำการทดสอบโดยใช้ R123 เป็นสารทำงาน ที่มุมเอียง 90° พบว่าท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 ให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.85 kW/m^2 เพิ่มขึ้นจากท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 ที่มีค่าการส่งถ่ายความร้อน 15.49 kW/m^2 เท่ากับ 34.60 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวกับค่าการส่งถ่ายความร้อน สารทำงานเป็น R123 ที่มุมเอียง 90° พบว่า ค่าการส่งถ่ายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนความยาวมีค่าลดลง ซึ่งจะมีแนวโน้มเหมือนกันทุกสารทำงาน ที่สภาวะการทำงานปกติ



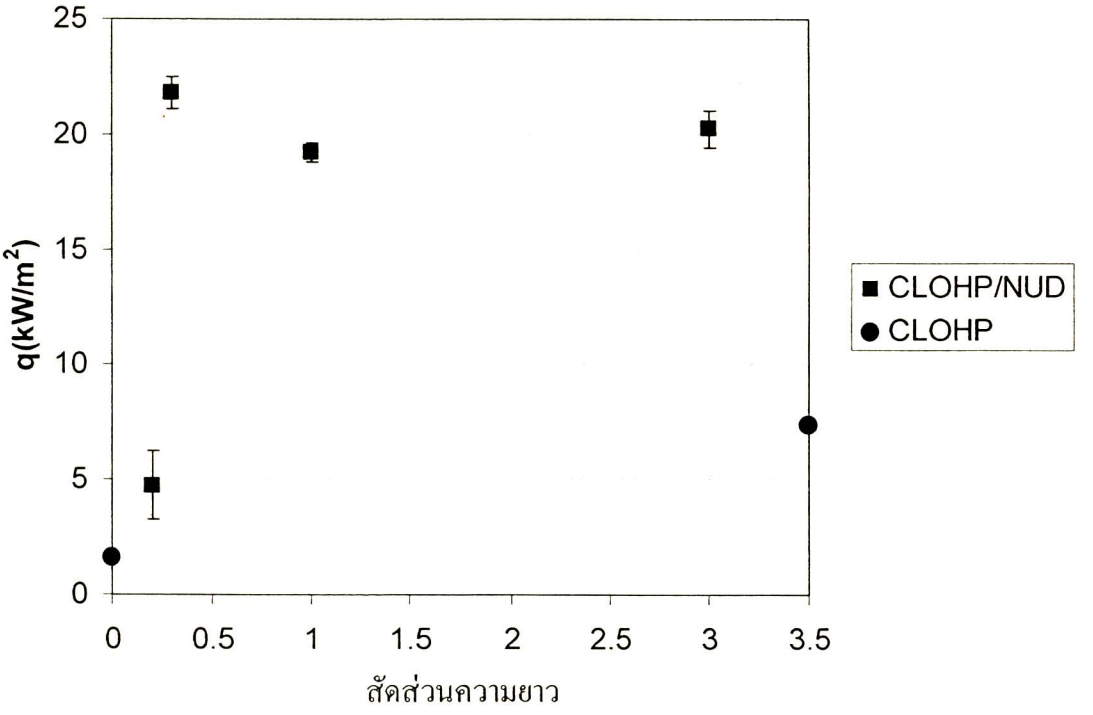
รูปที่ 3.22 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ชุดที่ 2



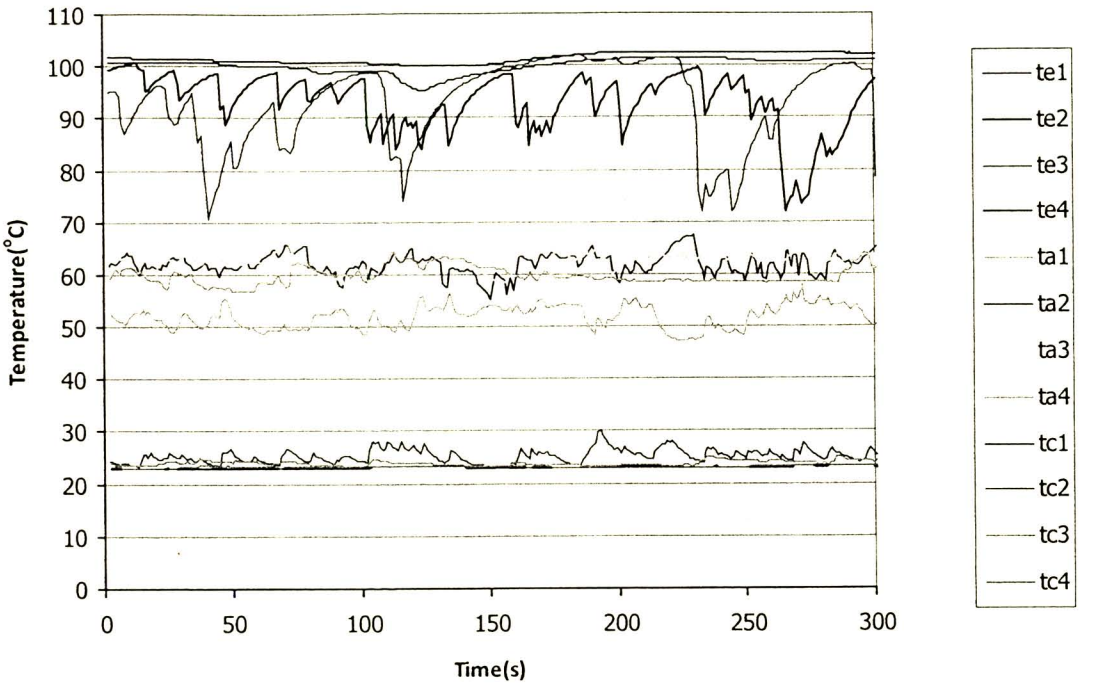
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ สารทำงาน R123 ที่มุมเอียง 90^{o}

แนวโน้มของค่าการส่งถ่ายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลงเข้าใกล้ค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เมื่อค่าสัดส่วนความยาวมีค่าต่ำมาก ดังจะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 3.24 ที่แสดงค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ สารทำงานเป็นน้ำ มุมเอียง 90^{o} ซึ่งเมื่อค่าสัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 หรือท่อส่วนใหญ่มีขนาด 1.06 mm จากการทดสอบพบว่าเกิดสภาวะวิกฤตโดยสังเกตได้จากอุณหภูมิท่อในส่วนทำระเหยมีค่าประมาณ 100 °C ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิซิลิโคนออยล์ แสดงว่าด้านในท่อความร้อนไม่มีสารทำงานมารับความร้อนหรือเกิดการแห้งขึ้นและมีค่าการส่งถ่ายความร้อนเท่ากับ 4.76 kW/m^2 ซึ่งลดลงจากสัดส่วนความยาว 0.33 ที่มีค่าการส่งถ่ายความร้อนเท่ากับ 21.79 kW/m^2 ซึ่งเป็นค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด และจากการศึกษาที่ผ่านมาของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 1.06 mm ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นเท่ากันที่ 100 mm สารทำงานเป็นน้ำ สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50% โดยปริมาตรภายในทั้งหมด มุมเอียง 90^{o} พบว่าท่อความร้อนมีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.6 kW/m^2 หลังจากนั้นก็ไม่สามารถทำงานได้ที่สภาวะปกติหรือสารทำงานภายในเกิดการแห้งขึ้น (dry out state) (Sakulchangsatjatai et al. 2007) ซึ่งแสดงว่าท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวต่ำจะมีค่าการส่งถ่ายความร้อนและมีปรากฏการณ์คล้ายกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าสัดส่วนความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 3 ค่าการส่งถ่ายความร้อนก็จะลดลงแต่มีค่าไม่แตกต่างกับที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 สังเกตได้จากค่า error bar ที่คาบเกี่ยวกัน

และจะมีค่าลดลงเมื่อมีค่าสัดส่วนความยาวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากท่อส่วนใหญ่จะมีขนาด 2.03 mm ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 2.03 mm ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm สารทำงานเป็นน้ำ สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 % โดยปริมาตรภายในทั้งหมด อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C อุณหภูมิส่วนควบแน่น 20 °C ที่มุมเอียง 90° มีค่าการส่งถ่ายความร้อนเท่ากับ 7.40 kW/m^2 สรุปได้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอมีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงกว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เช่นเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมา (Shi Liu *et al.*, 2007)



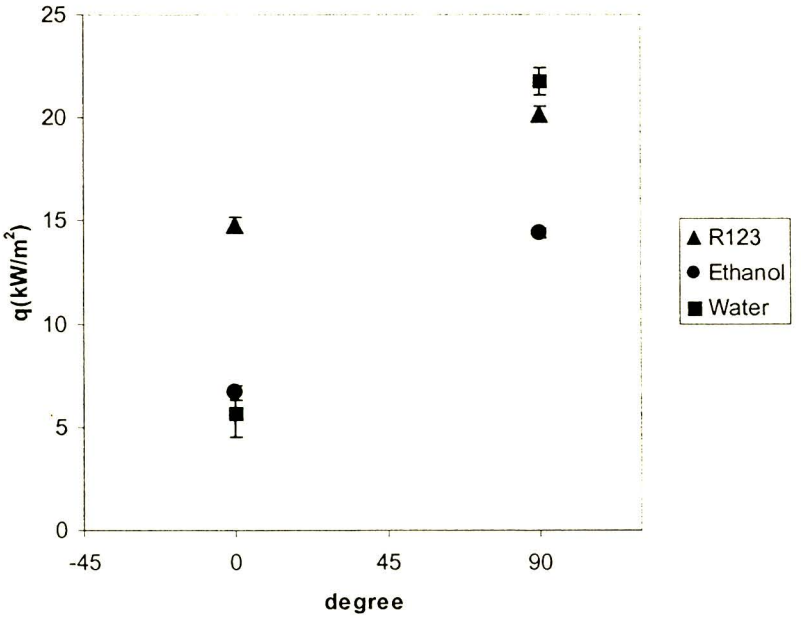
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ สารทำงานเป็นน้ำ ที่มุมเอียง 90°



รูปที่ 3.25 แสดงอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ สัดส่วนยาวเท่ากับ 0.2 สารทำงาน น้ำ มุมเอียง 90°

การที่ท่อความร้อนแบบสั่นมีสัดส่วนความยาวมากกว่า 1 แสดงว่า ท่อความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นท่อขนาดใหญ่แต่มีการเพิ่มท่อเล็กเข้าไปเล็กน้อย แม้ว่าจะเป็นการช่วยให้เกิดการไหลเวียนของสารทำงานในทิศทางเดียวแต่ก็เป็นการเพิ่มแรงเสียดทานการไหลในระบบเนื่องจากท่อมีขนาดเล็ก ในทางตรงกันข้ามการที่ท่อความร้อนแบบสั่นมีสัดส่วนความยาวน้อยกว่า 1 ซึ่งท่อความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นท่อเล็ก การเพิ่มท่อใหญ่เข้าไปนอกจากจะช่วยให้เกิดการไหลเวียนในทิศทางเดียวแล้วยังเป็นการลดแรงเสียดทานการไหลเนื่องจากขนาดท่อในระบบใหญ่ขึ้น นอกจากนี้การที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอมีค่าการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนความยาวลดลง เนื่องจากการลดสัดส่วนความยาวเป็นการลดจำนวนจุดเชื่อมต่อลงทำให้ความดันสูญเสีย (Head loss) เนื่องจากการลดขนาดท่อมีค่าลดลง สารทำงานจึงสามารถไหลเวียนได้ง่ายและไหลได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น และมีความเหมาะสมสำหรับการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อน ดังนั้นท่อความร้อนจึงส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้น

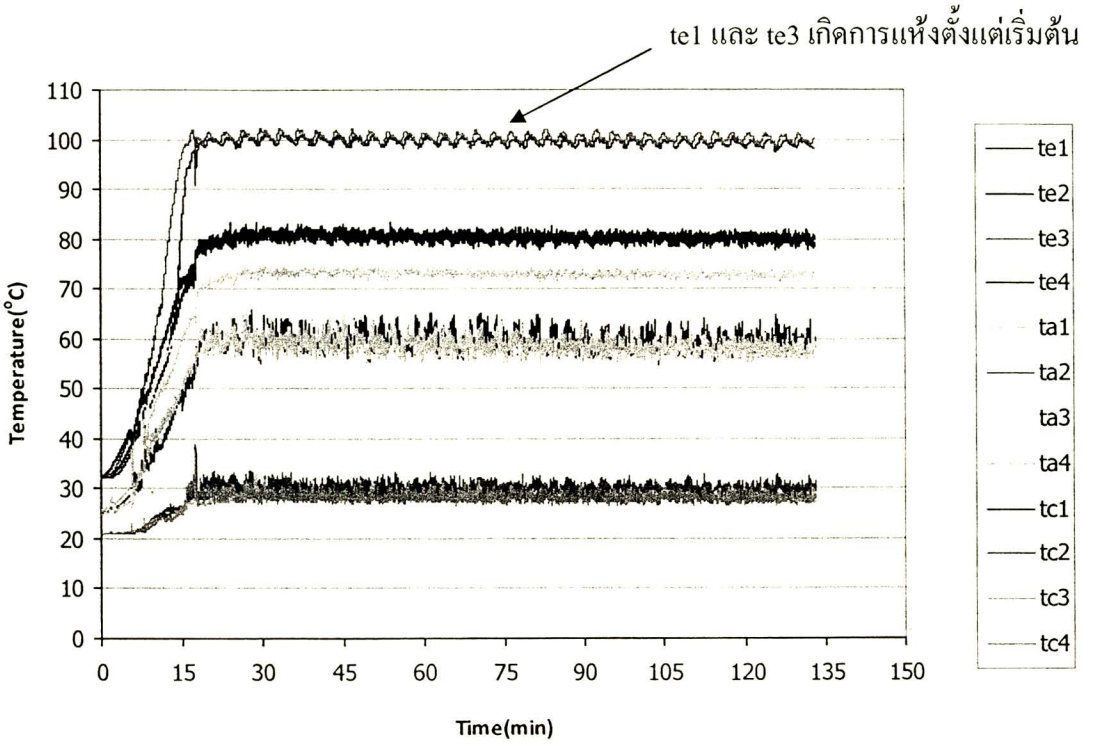
3.8 ผลของมุมเอียง



รูปที่ 3.26 มุมเอียงต่อค่าการถ่ายเความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาว 0.3

รูปที่ 3.26 แสดงผลของมุมเอียงต่อค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น วงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอสัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.3 จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว พบว่า ที่มุมเอียง 90^{O} เมื่อใช้สารทำงานเป็นน้ำ เอทานอล และR123 มีค่าการส่งถ่ายความร้อนเท่ากับ 21.79 kW/m^2, 14.14 kW/m^2 และ 20.16 kW/m^2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงกว่าที่มุมเอียง 0^{O} เมื่อใช้สารทำงานชนิดเดียวกันซึ่งมีค่าการส่งถ่ายความร้อนเท่ากับ 5.65 kW/m^2, 6.67 kW/m^2 และ 14.79 kW/m^2 ตามลำดับ และมีแนวโน้มเหมือนกันทุกสารทำงานและทุกสัดส่วนความยาว เนื่องจากว่า ในการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นนั้นจะอาศัยแรงดันจากการระเหยของสารทำงานและแรงโน้มถ่วงในการไหลเวียนสารทำงาน ซึ่งที่มุมเอียง 0^{O} นั้นแรงโน้มถ่วงจะไม่ปรากฏ จึงทำให้มีค่าการส่งถ่ายความร้อนลดลง

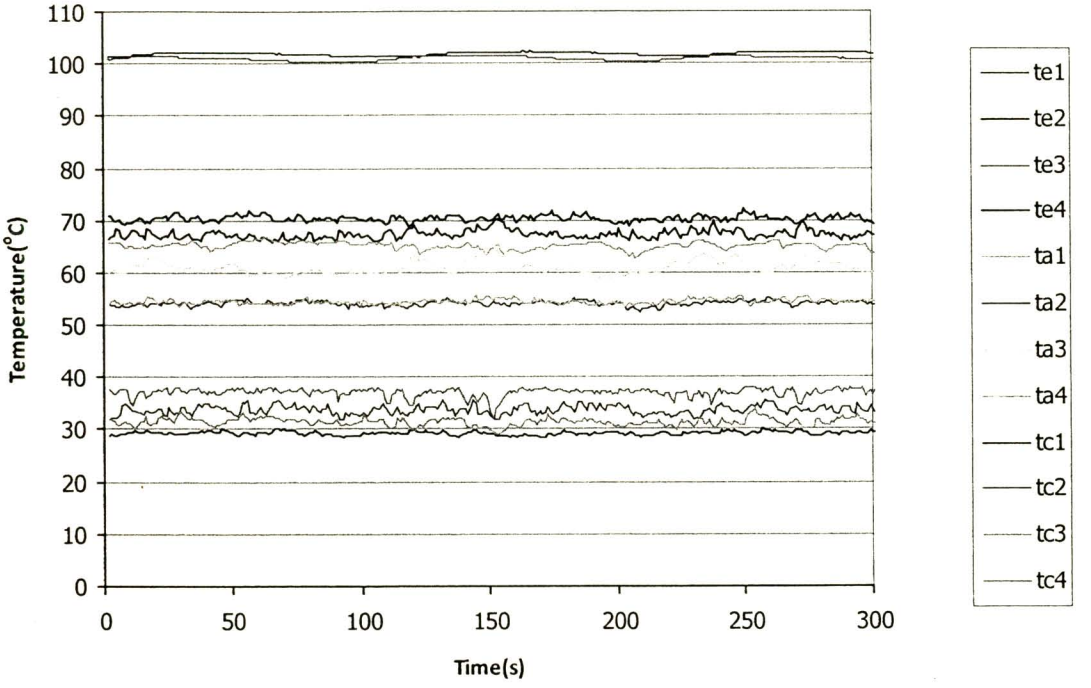
ในทุกการทดสอบที่มุม 0^{O} ท่อความร้อนแบบสั่นจะไม่สามารถทำงานได้ที่สภาวะปกติ เนื่องจากเกิดการแห้งที่ผิวท่อด้านใน ซึ่งในทุกการทดสอบที่เกิดการแห้งเป็นการแห้งตั้งแต่เริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 3.27 สังเกตได้จากกราฟเมื่อเริ่มทำการทดสอบจะเห็นว่าอุณหภูมิผิวของท่อความร้อนในส่วนทำระเหยจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเท่ากับอุณหภูมิซิลิโคนออยล์ที่ 100 $^{\circ}C$



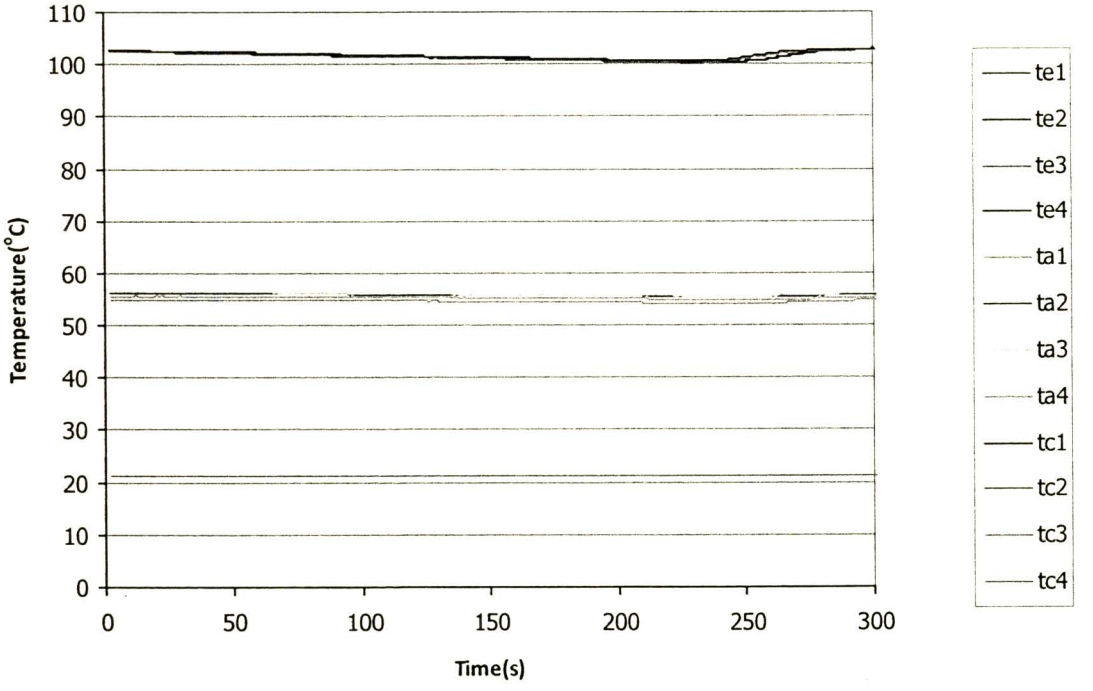
รูปที่ 3.27 แสดงอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.33 มุมเอียง 0° สารทำงานเป็น R123

การเกิดการแห้งนั้นจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การเกิดการแห้งเฉพาะท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm แต่ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 mm ไม่เกิดการแห้ง และการเกิดการแห้งทั้งท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm และท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 mm โดยจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.29 ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 มุมเอียง 0° ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากไม่มีแรงโน้มถ่วงช่วยในการไหลเวียน ดังนั้นสารทำงานที่ไหลเวียนได้ยากหรือสารทำงานเป็น น้ำ และ เอทานอล จึงเกิดการแห้งขึ้นในท่อทั้ง 2 ขนาด แต่ R123 นั้นสามารถไหลเวียนได้ง่ายกว่าแม้จะเกิดการแห้งที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ซึ่งเป็นท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดแต่ก็ยังสามารถไหลเวียนในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 mm ได้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

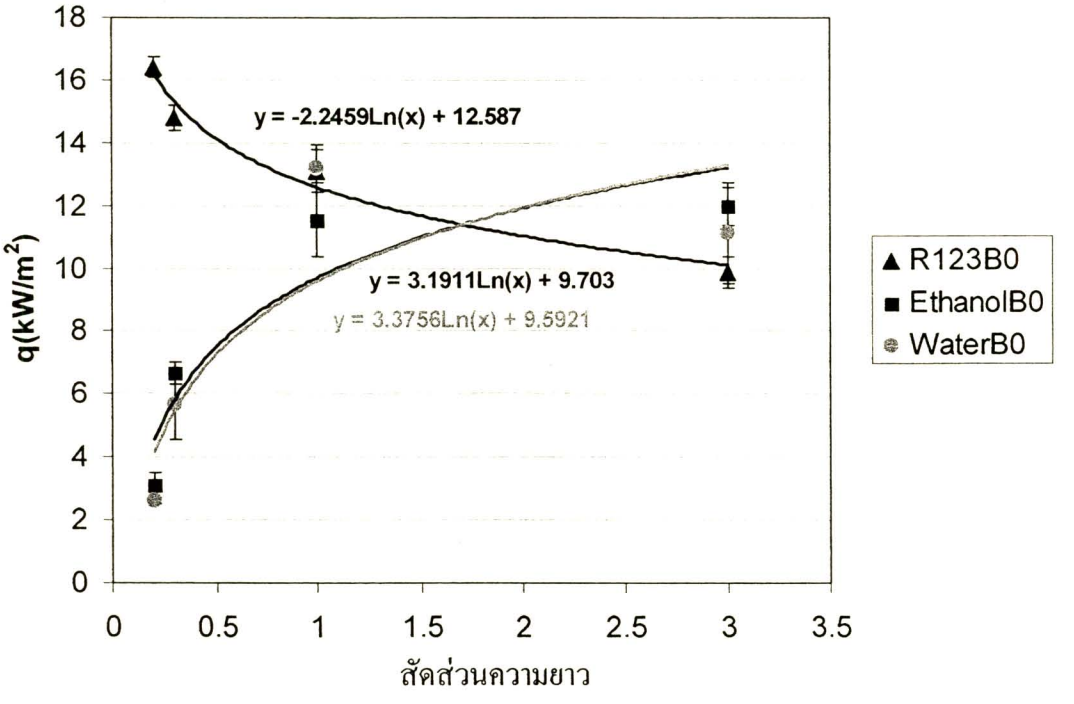


รูปที่ 3.28 แสดงอุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่า 0.2 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น R123 สภาวะคงที่

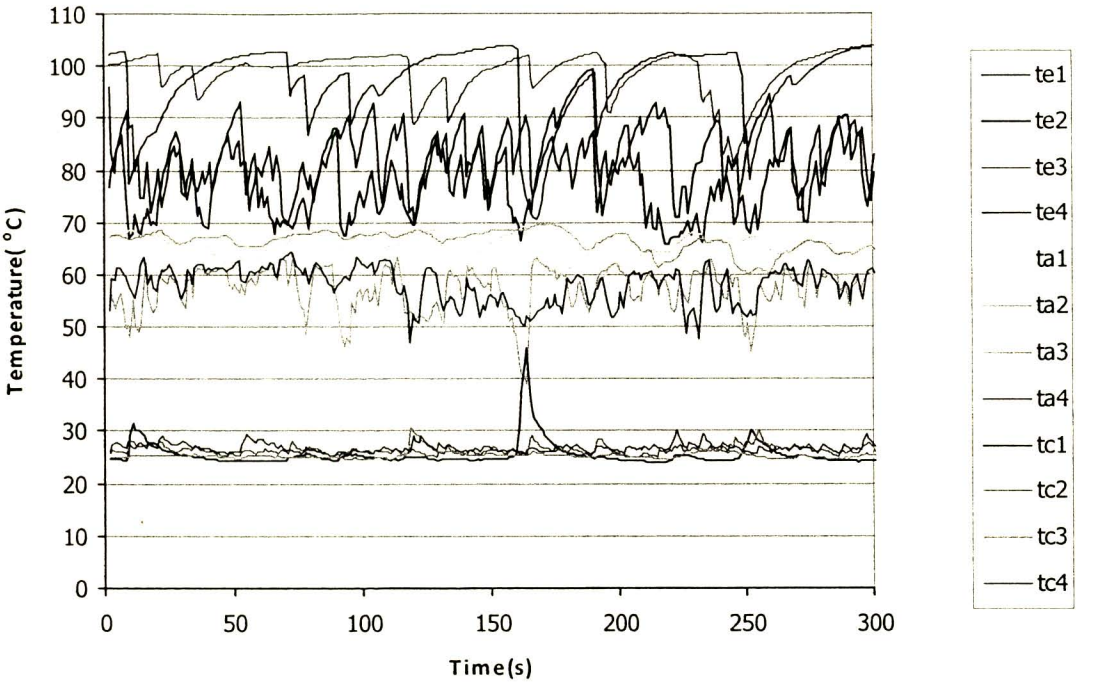


รูปที่ 3.29 อุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่า 0.2 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น น้ำ สภาวะคงที่

ท่อความร้อนแบบสั่นที่ใช้สารทำงานเป็น R123 นอกจากไหลเวียนได้ดีแล้ว ยังมีค่าความร้อนแฝงต่ำกว่าสารชนิดอื่น ทำให้เดือดได้ง่ายอีกด้วยจึงช่วยให้เกิดแรงดันในการไหลเวียนทำให้ท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 ที่ใช้ R123 เป็นสารทำงานมีค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สูง รูปที่ 3.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อนที่มุมเอียง 0° ของสารทำงาน R123 เอทานอล และน้ำ แต่ค่าการส่งถ่ายความร้อนจะลดลงเมื่อสัดส่วนความยาวสูงขึ้นเนื่องจากมีท่อขนาด 2.03 mm มากขึ้น ตรงกันข้ามกับเอทานอลและน้ำที่เมื่อสัดส่วนความยาวสูงขึ้นค่าการส่งถ่ายความร้อนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารทำงานจะเกิดการไหลเวียนได้ง่ายขึ้นเพราะมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ยาวขึ้น ยืนยันได้ด้วยอุณหภูมิสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นดังแสดงในรูปที่ 3.29 สำหรับท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 สารทำงานเป็นน้ำ จะไม่เห็นการสั่นของอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของท่อความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารทำงานภายในไม่มีการไหลเวียน แต่ในรูปที่ 3.31 ท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 3 สารทำงานเป็นน้ำ พบว่า มีการสั่นของอุณหภูมิในแต่ละส่วน ซึ่งแสดงว่าแม้จะเกิดการแห้งภายในท่อความร้อนแต่สารทำงานในบางส่วนก็ยังมีการไหลเวียนอยู่ทำให้มีค่าการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อน มุมเอียง 0° สารทำงาน R123 เอทานอล และ น้ำ



รูปที่ 3.31 แสดงอุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 3 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น น้ำ สภาวะคงที่