



สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THERMAL PERFORMANCE OF CLOSED-LOOP OSCILLATING HEAT PIPE WITH
DOUBLE HEAT SOURCES



By

MR. Poomin KRISANGSRI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2020
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่ง รับความร้อนสองแหล่ง
โดย	ภูมินทร์ ไกรแสงศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุดาการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ

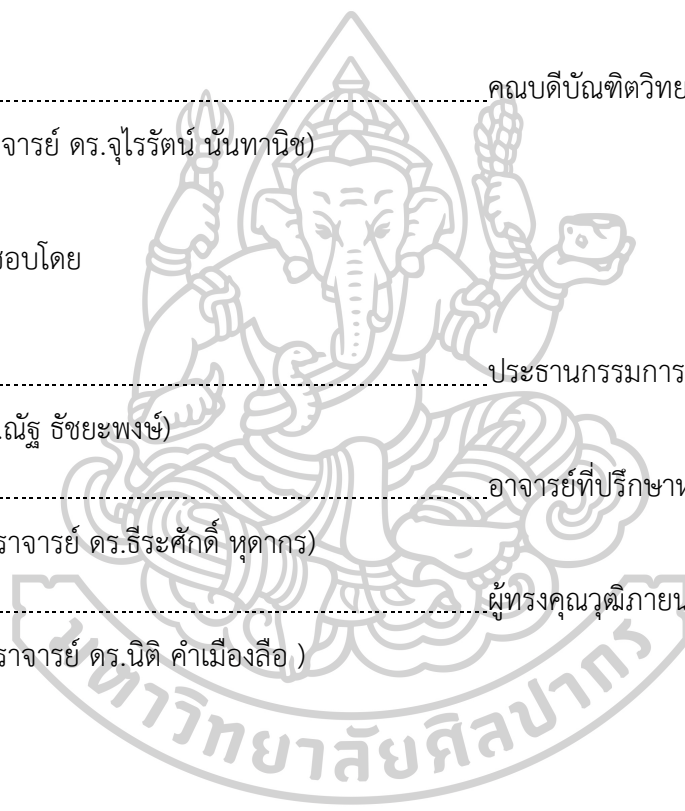
(อาจารย์ ดร.ณัฐ รัชยะพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีระศักดิ์ หุดาการ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติ คำเมืองลือ)



60406202 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : สมรรถนะทางความร้อน, ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, แหล่งรับความร้อนสองแหล่ง, ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่

นาย ภูมิินทร์ ไกรแสงศรี: สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุตากร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ที่สภาวะคงที่ ทดลองโดยวางชุดทดลองแนวตั้งและแนวนอน การทดลองใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบทำมาจากท่อคาปรีลารี เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร ใช้สารทำงาน R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด การออกแบบประกอบด้วยส่วนทำระเหย 2 ส่วนถูกวางไว้ปลายด้านนอกของชุดทดลองและมีส่วนควบแน่น 1 ส่วน ถูกวางไว้ตรงกลางของชุดทดลอง ไม่มีส่วนกันความร้อน ขดลวดนิโครมเป็นแหล่งให้ความร้อนในส่วนทำระเหย ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหย 40-100 องศาเซลเซียส ส่วนควบแน่นถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.3-0.4 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่า การวางชุดทดลองในแนวตั้งและแนวนอน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และความยาวส่วนทำระเหยมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าลดลง ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยว ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของสารทำงานแต่ละชนิดสำหรับการวางชุดทดลองในแนวตั้ง ความหนืดจลน์ของสารทำงานแต่ละชนิดสำหรับการวางชุดทดลองในแนวนอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การวางชุดทดลองในแนวตั้งมีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าการวางในแนวนอน

60406202 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : Thermal performance, closed-loop oscillating heat pipe, Double heat sources, Thermal resistance per unit area

MR. POOMIN KRISANGSRI : THERMAL PERFORMANCE OF CLOSED-LOOP OSCILLATING HEAT PIPE WITH DOUBLE HEAT SOURCES THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TEERASAK HUDAKORN

The objective of this research to experimentally investigated the thermal performance of a closed-loop oscillating heat pipe with double heat sources (CLOHP w/DHS) at steady state condition with horizontal and vertical orientation. The CLOHP w/DHS were made of a copper capillary tube with inner diameters of 1.0, 1.5 and 2.0 mm and bent into a meandering turn with 16, 32 and 40 turns. Evaporator section length were 50, 100 and 150 mm. R123, ethanol, and water were used as working fluids with a filling ratio of 50% by volume. Two evaporator sections were located at the outer end of the bundle, while one condenser section was positioned on the middle of the CLOHP with no adiabatic section. The evaporator sections of CLOHP w/DHS were heated by Ni-Cr alloy resistance wire heaters. Evaporator temperature was controlled at 40-100 and heat was removed from the condenser sections by forced convective heat transfer of in blown ambient air. Airflow velocity was maintained at 0.3-0.4 m/s. It was found from the study that when the inner diameter and the evaporator section lengths increased, the thermal resistance continuously decreased. On the other hand, when the number of turns, the latent heat of each working fluids for vertical orientation and the kinematic viscosity of each working fluids for horizontal orientation increased, the thermal resistance tend to increased. However, vertical orientation was more thermal performance than horizontal orientation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดีจากการแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ณัฐ รัชยพงษ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติ คำเมืองลือ กรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ให้ความรู้เพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณ อาจารย์นพพงศ์ ศรีตระกูล ที่คอยให้คำปรึกษาในการติดตั้งชุดทดลองและแนะแนวทางในการแก้ปัญหาในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณนายอัมฤทธิ์ แป้นไทย ที่ให้ความช่วยเหลือ แก้ปัญหาและคำแนะนำในการออกแบบชุดทดลอง พร้อมทั้งวางแผนเตรียมการทดลองต่างๆ ขอขอบคุณนายชยพันธ์ หอมเนียม ที่ร่วมกันช่วยแก้ปัญหาในระหว่างการทดลองและคอยพาไปซื้ออุปกรณ์การทดลองต่างๆ ที่ชำรุด ขอขอบคุณนายธีระชัย สุระโชติเวศย์ ที่คอยให้คำแนะนำในการทำเล่มวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณนายศุภพงษ์ พรหมมาศและนายวุฒิพงษ์ ทองคนารักษ์ ที่คอยช่วยเหลือในการวัดค่าต่างๆ และช่วยเก็บผลการทดลองสำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณ นายวิศณุ เช่นบัว ที่ช่วยเหลือในการแนะนำวิธีการพูด วิธีการนำเสนอผลงานทางวิชาการที่ติดตลอดจนขอขอบคุณ นางสาวรินรดา บุตรมาตย์ ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ อีกหลายท่านที่ไม่อาจเอ่ยนามได้ครบ ที่คอยรับฟังปัญหาและให้กำลังใจเสมอมา ความสำเร็จใดๆ ที่เกิดขึ้นขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้จัดทำคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดประโยชน์แก่การพัฒนาทางด้านพลังงานในอนาคตต่อไป

ภูมินทร์ ไกรแสงศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการวิจัย.....	4
1.7 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	5
1.8 ความจำกัดของการวิจัย	5
1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ท่อความร้อนแบบสั้น	7
2.2 การออกแบบชุดทดลองหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่ง รับความร้อนสองแหล่ง	9
2.3 ลักษณะการเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบสั้น.....	12

2.4 สารทำงาน	14
2.4.1 สารทำความเย็น R-123.....	14
2.4.2 เอทานอล (Ethanol).....	14
2.4.3 น้ำกลั่น (Distilled water)	15
2.5 รูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ	16
2.5.1 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่วางตัวในแนวตั้ง	16
2.5.2 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่วางตัวในแนวนอน	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.5.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน.....	19
2.5.2 ผลของความสั่นไหวที่กระทำต่อสมรรถนะทางความร้อน.....	20
2.5.3 ผลของจำนวนโค้งเกลียวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน	20
2.5.4 ผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน	21
2.5.5 ผลของสารทำงานที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน.....	22
2.5.6 ผลของอัตราส่วนการเติมที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.2 สถานที่ทำการทดลอง	32
3.3 การวางแผนการทดลอง.....	32
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	37
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการสรุปงานวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการดำเนินการและอภิปรายผล	51
4.1 สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่วางตัวในแนวตั้ง.....	51

4.1.1	ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	51
4.1.2	ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง.....	54
4.1.3	ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง.....	56
4.1.4	ผลของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	60
4.2	สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่วางตัวในแนวนอน	66
4.2.1	ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	67
4.2.2	ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง.....	69
4.2.3	ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง.....	72
4.2.4	ผลของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	74
4.3	ผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง.....	83
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	87
5.1	ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งวางตัวในแนวตั้ง.....	87
5.2	ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งวางตัวในแนวนอน.....	88
5.3	ผลการเปรียบเทียบการวางแนวชุดทดลองที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	89
5.4	ข้อเสนอแนะ	89

รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	106
ภาคผนวก ค.....	112
ภาคผนวก ง.....	122
ภาคผนวก จ.....	132
ภาคผนวก ฉ.....	142
ภาคผนวก ช.....	224
ประวัติผู้เขียน.....	239



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานความร้อนเมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น 61

ตารางที่ 2 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานความร้อนเมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น 75



สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 รูปแบบการให้ความร้อนและการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ	3
รูปที่ 2 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ [8]	7
รูปที่ 3 แสดงภาพจำลองของท่อความร้อนแบบสั้น [9]	8
รูปที่ 4 หลักการพื้นฐานของท่อความร้อนแบบสั้น [11]	9
รูปที่ 5 การเกิดฟองไอสลับกับแท่งของเหลวในท่อคาปิลลารี [2]	10
รูปที่ 6 แสดงชนิดของท่อความร้อนแบบสั้น [12]	11
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับค่าเอนทัลปีของท่อความร้อนแบบสั้น	12
รูปที่ 8 แสดงลักษณะของฟองไอลงในท่อความร้อนแบบสั้น [14]	13
รูปที่ 9 แสดงลักษณะของฟองไอบนแบบ Globe และ Column [14]	13
รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างของสารทำความเย็น R-123 [15]	14
รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างของเอทานอล [15]	15
รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างของน้ำกลั่น [15]	15
รูปที่ 13 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวตั้ง [16]	17
รูปที่ 14 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ [16]	18
รูปที่ 15 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับค่าการถ่ายเทความร้อน	19
รูปที่ 16 ผลของความยาวส่วนทำระเหย [5]	20
รูปที่ 17 อิทธิพลของจำนวนโค้งเลี้ยว [5]	21
รูปที่ 18 ผลของความร้อนแฝงกับค่าความหนาแน่นความร้อน [19]	22
รูปที่ 19 แสดงผลของอัตราส่วนการเติมกับค่าความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่ [5]	23
รูปที่ 20 ท่อคาปิลลารีทองแดง (Heat pipe)	24
รูปที่ 21 แสดงสารทำงานที่ใช้ในงานวิจัย (ก) เอทานอล (ข) น้ำกลั่น และ (ค) R123	25

รูปที่ 22	ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump).....	25
รูปที่ 23	แสดงชุดเติมสารทำงาน	26
รูปที่ 24	แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter) รุ่น Kewtech KT203	26
รูปที่ 25	Temperature Display	27
รูปที่ 26	เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger).....	27
รูปที่ 27	เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermo couple)	28
รูปที่ 28	ปลอกสายทนความร้อน (เทปใยแก้ว).....	28
รูปที่ 29	ลวดนิโครม	29
รูปที่ 30	แอนนิมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน (hot-wire anemometer) รุ่น testo 425.....	29
รูปที่ 31	มัลติฟังก์ชันมิเตอร์ (Multi-Function meter) รุ่น Testo 435.....	30
รูปที่ 32	พัดลมระบายความร้อน (Cooling fan).....	30
รูปที่ 33	แผ่นอลูมิเนียมเทปฟอยล์ (Aluminium tape foil).....	31
รูปที่ 34	แผ่นสังกะสีหนา 0.3 mm	31
รูปที่ 35	แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลการทดลองของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง	34
รูปที่ 36	แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร	35
รูปที่ 37	แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร.....	36
รูปที่ 38	แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร.....	36
รูปที่ 39	แสดงการนำท่อทองแดงมาขดเป็นวงรอบโดยใช้พีวีซียึด	37
รูปที่ 40	แสดงการขดท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ โดยแปรความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มม และความยาวส่วนควบแน่นคงที่ 50 มม	38
รูปที่ 41	แสดงการพับแผ่นสังกะสีเพื่อประกอบกับท่อทองแดง.....	38

รูปที่ 42 แสดงการนำแผ่นสังกะสีมาถ่วงเพื่อใช้สำหรับกั้นระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น	39
รูปที่ 43 แสดงการใส่ปลอกฉนวนใยแก้วไปยังท่อความร้อน	39
รูปที่ 44 แสดงการประกอบกล่องสังกะสี แผ่นสังกะสี และท่อทองแดง เชื่อมวาล์วศรเพื่อใช้เติม	40
รูปที่ 45 แสดงการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลและการติดตั้งสายไฟเพื่อให้ความร้อน	41
รูปที่ 46 เตรียมทำฐานตั้งชุดทดลอง	41
รูปที่ 47 ทำฐานตั้งชุดทดลอง	41
รูปที่ 48 แสดงฐานชุดทดลองและตู้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟ	42
รูปที่ 49 แสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะของท่อถ่ายเทความร้อนแบบสันวงรอบวางแนวนอน	42
รูปที่ 50 แสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะของท่อถ่ายเทความร้อนแบบสันวงรอบวางแนวตั้ง	42
รูปที่ 51 อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายความร้อนให้กับชุดทดลอง	43
รูปที่ 52 แสดง Switching power supply 12 V 40 A 480 W	43
รูปที่ 53 แสดง รีเลย์ไฟฟ้า 10 A 12 V DC	44
รูปที่ 54 แสดง DC Motor speed control 10-50 V 40 A 2000 W	44
รูปที่ 55 แสดง Safety Breaker	45
รูปที่ 56 แสดง สวิตช์ปิด-เปิดพัดลมระบายความร้อน	45
รูปที่ 57 แสดง Temperature controller	46
รูปที่ 58 แสดงการติดตั้งชุดทดลองบนฐานปรับระดับองศาและต่อเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟ	46
รูปที่ 59 แผงผังชุดทดลองและการต่อวัตต์อุณหภูมิจุดต่างๆ 20 จุด	47
รูปที่ 60 แสดงภาพหน้าตัดตำแหน่งการวัดความเร็วลมภายในส่วนควบแน่น	48
รูปที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว	52
รูปที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว	52

รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว..... 53

รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 54

รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 55

รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 55

รูปที่ 67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน..... 56

รูปที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 57

รูปที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 57

รูปที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 58

รูปที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเลี้ยวสำหรับการวางแนวตั้ง 59

รูปที่ 72 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่ต่อสมรรถนะทางความร้อนดับผลงานวิจัยของ Kammuang-lue และคณะ [20] วางชุดทดลองในแนวตั้ง..... 60

รูปที่ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=16 Di=1.5 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง..... 62

รูปที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.5 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง 62

รูปที่ 75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=40 Di=1.5 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง 63

รูปที่ 76 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งกับสองแหล่ง 64

รูปที่ 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง Di 2.03 mm Le 100 mm T 16 turn สารทำงานคือ เอทานอล 65

รูปที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 67

รูปที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 67

รูปที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว 68

รูปที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม 69

รูปที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม 70

รูปที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม 70

รูปที่ 84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.07 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน 71

รูปที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 72

รูปที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 72

รูปที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ 73

รูปที่ 88 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเลี้ยวสำหรับการวางแนวนอน. 74

รูปที่ 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน 76

รูปที่ 90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=2 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน 76

รูปที่ 91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=3 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน 77

รูปที่ 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน 78

- รูปที่ 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อน
ของชุดทดลอง $T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=2$ มุมเอียงการทำงานในแนวนอน..... 79
- รูปที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อน
ของชุดทดลอง $T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=2$ มุมเอียงการทำงานในแนวนอน..... 79
- รูปที่ 95 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่วางชุด
ทดลองในแนวนอน $D_i = 2.03$ มม 81
- รูปที่ 96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิบริเวณต่างๆของ..... 82
- รูปที่ 97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับผลต่างอุณหภูมิด้านซ้ายและด้านขวาของ..... 82
- รูปที่ 98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแตกต่างของความดันด้านซ้ายและด้านขวาของชุด
ทดลอง $D_i 2.03$ มม $L_e 50$ มม $T 16$ โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ..... 83
- รูปที่ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 1
ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม . 84
- รูปที่ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 2
ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม . 84
- รูปที่ 101 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 3
ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม 85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางวิศวกรรมได้พัฒนาไปอย่างมาก จะเห็นได้จากอุปกรณ์และเครื่องใช้อำนวยความสะดวกต่างๆ ที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในทางกลับกันต้องแลกกับสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นคือ ความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวอุปกรณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นจุดเดียวหรือหลายจุดของตัวอุปกรณ์ ส่งผลให้อุปกรณ์เหล่านั้นเกิดความร้อนสะสม เมื่อปล่อยไว้เป็นเวลานานๆอาจจะทำให้เกิดการชำรุดเสียหายได้ ท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นเทคโนโลยีระบายความร้อนอย่างหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ระบายความร้อนแก่อุปกรณ์เพื่อลดอุณหภูมิในตัวอุปกรณ์และรักษาอายุการใช้งานของอุปกรณ์ โดยท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานด้วยตัวเองโดยไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก ทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้ระบายความร้อนกับอุปกรณ์ต่างๆได้และเป็นนิยมมากในปัจจุบัน

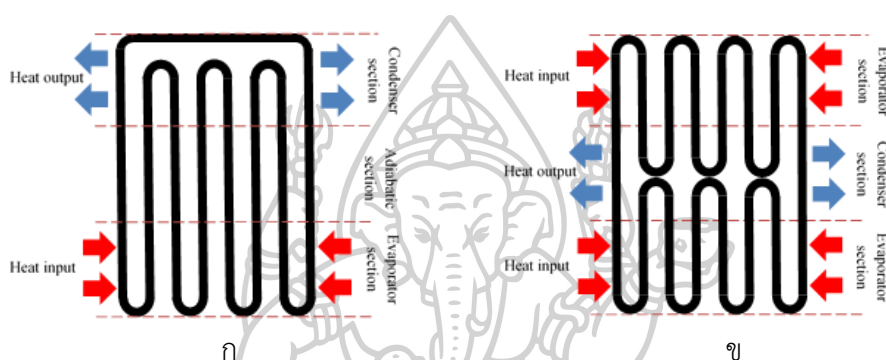
ท่อความร้อน (Heat pipe) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ขนย้ายพลังงานความร้อนผ่านกระบวนการระเหยและการควบแน่น โดยท่อความร้อนจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ โน้ตบุ๊ก แล็ปท็อป เป็นต้น ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตมากขึ้นจึงได้มีการคิดค้นท่อความร้อนรูปแบบใหม่ขึ้นเรียกว่า ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe) ซึ่งถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดยนักวิจัย Akachi et al. [1] ท่อความร้อนแบบสั่นมีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่มีการบรรจุสารทำงานเข้าไปภายในท่อความร้อนที่มีสภาวะเป็นสุญญากาศ เพื่อสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อจะมีจุดเดือดที่ต่ำลง ช่วยให้การเดือดของสารทำงานเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ท่อความร้อนแบบสั่นโดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe: CEOHP) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-loop oscillating heat pipe: CLOHP) และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเช็ควาล์ว (Closed-loop oscillating heat pipe with check valve: CLOHP/CV) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาท่อความร้อนแบบสั่นชนิด CLOHP เนื่องจากท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดและมีโครงสร้างภายในที่ไม่ซับซ้อนกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนที่ป้อนเข้าจากแหล่งความร้อน (Heat source) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) เป็นส่วนที่ป้องกันความร้อนสูญเสีย และส่วนควบแน่น (condenser section) เป็นส่วนที่ระบายความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม [2,3] ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) โดยท่อความร้อนแบบสั่นสามารถถ่ายเทความ

ร้อนได้ด้วยตัวเองทันที เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อน สารทำงานภายในท่อจะเกิดกลายระเหย กลายเป็นไอ และเคลื่อนที่ไประบายความร้อนที่ส่วนควบแน่น โดยอาจมีของไหลอื่นๆ เช่น น้ำ อากาศ เป็นต้น มารับความร้อนจากผิวท่อเพื่อนำความร้อนไปใช้งานต่อไป หลังจากนั้นสารทำงานภายในท่อ จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลกลับไปรับความร้อนที่ส่วนทำระเหยเป็นวัฏจักร

จากการศึกษางานวิจัยการทดสอบท่อความร้อนแบบสัณวงรอบพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (Internal diameter) มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ นั่นคือเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเพิ่มขึ้นทำให้ช่องการไหลของสารทำงานที่อยู่ภายในเพิ่มขึ้นและพื้นที่รับความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น [4] สำหรับตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนนั้นคือ สารทำงาน (Working fluids) ถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบมีความแตกต่างกันด้วย ตัวแปรต่อมาคือ ความยาวส่วนทำระเหย (Evaporator section) เนื่องจากส่วนทำระเหยเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนเมื่อความยาวส่วนทำระเหยมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีความสามารถในการรับความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งความยาวส่วนทำระเหยที่เหมาะสมจะส่งผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสมรรถนะทางความร้อนที่ดีที่สุดจะมีค่าความยาวส่วนทำระเหยอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร [5] ในการออกแบบท่อความร้อนแบบสัณวงรอบส่วนที่ทำให้สารทำงานไหลวนรอบและเป็นส่วนที่รับความร้อนและระบายความร้อนก็คือจำนวนโค้งเลี้ยว (Turn) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจำนวนโค้งเลี้ยวที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อแรงดันไดนามิกส์ภายในท่อส่งผลต่อสมรรถนะทางความร้อน [6] มุมเอียง (Inclination angle) จะมีผลต่อรูปแบบการไหลของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อ จากการศึกษางานวิจัยการทดสอบท่อความร้อนแบบสัณวงรอบพบว่า ท่อความร้อนสั้นที่มุมเอียงการทำงาน 90° (แนวตั้ง) ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบแนวนอน เนื่องจากผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก แสดงให้เห็นว่ามุมเอียงมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อน [7] และตัวแปรอื่นๆ

ส่วนใหญ่ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบจะถูกออกแบบให้ใช้กับแหล่งรับความร้อน 1 แหล่ง และปล่อยความร้อนไปยังแหล่งระบายความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อน 1 แหล่ง ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หากมีสองแหล่งรับความร้อน ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบก็จะเพิ่มขึ้นอีกเท่าส่งผลให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้น ซึ่งในด้านการตลาดความต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ มีขนาดกะทัดรัด เคลื่อนย้ายง่าย เป็นต้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบท่อความร้อนให้มีแหล่งรับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนสองแหล่งและมีแหล่งระบายความร้อนหนึ่งแหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เนื่องจากยังไม่ปรากฏการศึกษาใดที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้ ทำให้ยังคงขาดแคลนองค์ความรู้พื้นฐานที่จะนำมาออกแบบท่อความ

ร้อนเพื่อนำไปใช้จริง โดยการจัดเรียงแหล่งความร้อนจะมีลักษณะดังนี้ จะมีแหล่งระบายความร้อนอยู่บริเวณตรงกลางของชุดทดลองและมีแหล่งรับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนติดตั้งบริเวณสองข้างของแหล่งระบายความร้อน เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาที่ตัวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นหลัก ยังไม่มีการนำท่อความร้อนไปใช้งานกับอุปกรณ์เฉพาะใดๆ ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สามารถนำไปต่อยอดสำหรับประยุกต์ใช้จริงได้ และท่อความร้อนที่ได้ออกแบบนี้ถูกตั้งชื่อใหม่ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง (Close-loop oscillating heat pipe with double heat sources: CLOHPw/DHS)



รูปที่ 1 รูปแบบการให้ความร้อนและการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
ก.) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ข.) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ที่มุมเอียงทำงาน 0 และ 90 องศา โดยทำการแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวส่วนทำระเหย สารทำงาน จำนวนโค้งเลี้ยว และเปรียบเทียบมุมเอียงการทำงานในแนวตั้งและแนวนอน

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว มุมเอียง และสารทำงานที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว มุมเอียงการทำงาน และสารทำงานมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบชนิดมีแหล่งให้ความร้อนสองแหล่ง

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว มุมเอียงการทำงานและชนิดของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ (Closed loop heat pipe) ทำมาจากท่อทองแดง

1.5.2 กำหนดท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1.0, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร

1.5.3 กำหนดความยาวส่วนทำระเหยจำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร

1.5.4 กำหนดจำนวนโค้งเลี้ยวทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว

1.5.5 กำหนดสารทำงานที่นำมาใช้ในการทดลองจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ R-123 เอทานอลและ น้ำกลั่น

1.5.6 อัตราส่วนการเติมสารทำงานคือ 50% โดยปริมาตรท่อทั้งหมด

1.5.7 กำหนดมุมเอียงของท่อความร้อนจำนวน 2 มุม ได้แก่ 0° (แนวนอน) และ 90° (แนวตั้ง)

1.5.8 กำหนดอุณหภูมิส่วนทำระเหยอยู่ระหว่าง 40-100 °C โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 °C

1.5.9 ระบายความร้อนด้วยอากาศแบบการพาความร้อนแบบบังคับ

1.5.10 ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัยเท่ากับ 25 ± 3 °C

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย

1.6.1 ศึกษาเอกสารบทความงานวิจัยและข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง ที่ส่งผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว เป็นต้น

1.6.2 ทำการทดลองท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ภายใต้ขอบเขตการทดลองที่กำหนด

1.6.3 รวบรวมผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์และสรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

1.7 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.7.1 การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 1.0, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R-123 เอทานอล และ น้ำกลั่น ทดสอบทั้งการวางแนวนอนและแนวตั้ง ได้ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.7.2 การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตของการทดลองเท่านั้น

1.8 ความจำกัดของการวิจัย

1.8.1 ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 1.0, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R-123 เอทานอล และ น้ำ ทดสอบทั้งการวางแนวนอนและแนวตั้ง

1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.9.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คือ การถ่ายเทของพลังงานความร้อน การถ่ายเทความร้อนซึ่งสามารถจำแนก ได้ออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

-การนำความร้อน (Heat conduction) คือ โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

-การพาความร้อน (Heat convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ในสสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซ

-การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน

1.9.2 ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe) คือ อุปกรณ์สำหรับส่งถ่ายความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน

1.9.3 มุมเอียง (Inclination angle) คือ มุมการทดลองโดยเทียบกับแนวระดับ

1.9.4 ความยาวส่วนทำระเหย (Evaporator section) คือ ความยาวส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งรับความร้อน ส่วนนี้จะมีหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารทำงานที่อยู่ภายในท่อเพื่อให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะ

1.9.5 ความยาวส่วนควบแน่น (Condenser section) คือ ความยาวส่วนที่ให้สารทำงานถ่ายเทความร้อนที่มีในตัวออกสู่สิ่งแวดล้อม

1.9.6 โค้งเลี้ยว (Turn) คือ ส่วนที่เชื่อมระหว่างท่อตรงทั้งสองของท่อความร้อนแบบสันมีลักษณะเป็นท่อโค้งงอ

1.9.7 สารทำงาน (Working fluid) ทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อน

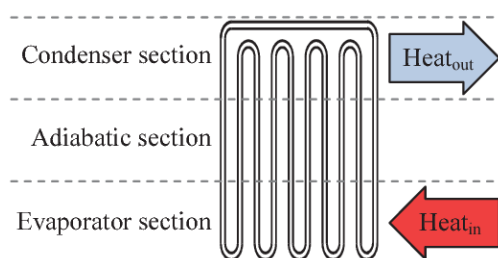


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

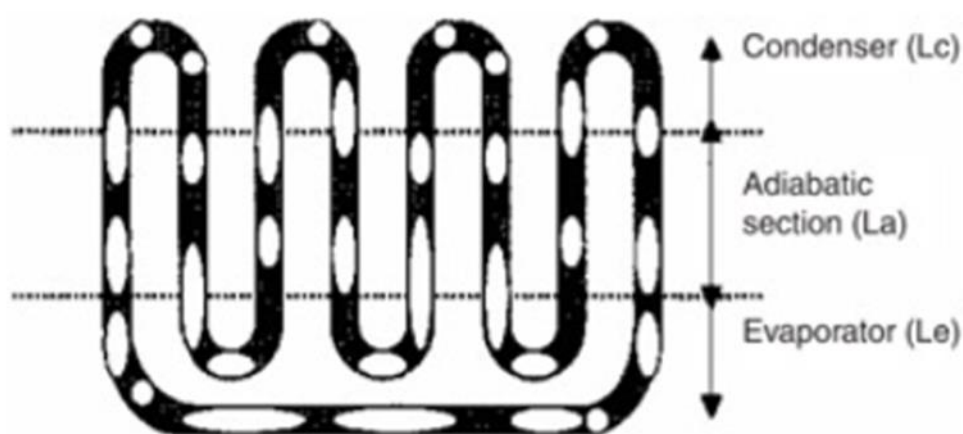
2.1 ท่อความร้อนแบบสั่น

ท่อความร้อนแบบสั่นจะมีลักษณะเป็นท่อคาปิลลารี (ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่เล็ก) ที่นำมาตัดโค้งกลับไปกลับมาระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่น ภายในท่อคาปิลลารีจะมีสารทำงานอยู่ 2 แบบ คือ ส่วนแห่งของเหลว (Liquid slug) และส่วนฟองไอ (Vapor bubble) สารทำงานทั้งสองรูปแบบจะจัดเรียงตัวแบบสลับกันไปมา ท่อความร้อนแบบสั่นจะสามารถทำงานได้ทั้งในแนวระดับและแนวตั้ง โดยทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed end oscillating heat pipe: CEOHP) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed loop oscillating heat pipe: CLOHP) และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (Closed loop oscillating heat pipe with check valve: CLOHP/CV) โดยท่อทั้ง 3 ชนิดจะแตกต่างกันที่ลักษณะของการเชื่อมต่อปลายท่อและการติดตั้งวาล์วกันกลับเพิ่มเข้าไปยังท่อความร้อนโดยท่อความร้อนแบบสั่น นอกจากนี้ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นคือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนที่ส่วนทำระเหย สารทำงานจะระเหยกลายเป็นไอ และเคลื่อนที่ผ่านส่วนกันความร้อนมายังส่วนควบแน่นโดยไม่มีการสูญเสียความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อนจะอยู่ในรูปแบบการสั่น (Oscillating) กล่าวคือเมื่อสารทำงานภายในท่อเกิดการเดือด สารทำงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแห่งของเหลว (Liquid slug) สลับกับฟองไอ (Vapor) [8] ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้เกิดการเคลื่อนที่พาความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น เมื่อสารทำงานภายในท่อที่เปลี่ยนสถานะจากแห่งของเหลวเป็นฟองไอ เคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นและถ่ายเทความร้อนเป็นที่เรียบร้อย ฟองไอของสารทำงานภายในท่อจะเกิดการควบแน่นและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวและไหลกลับมายังส่วนทำระเหยอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force)



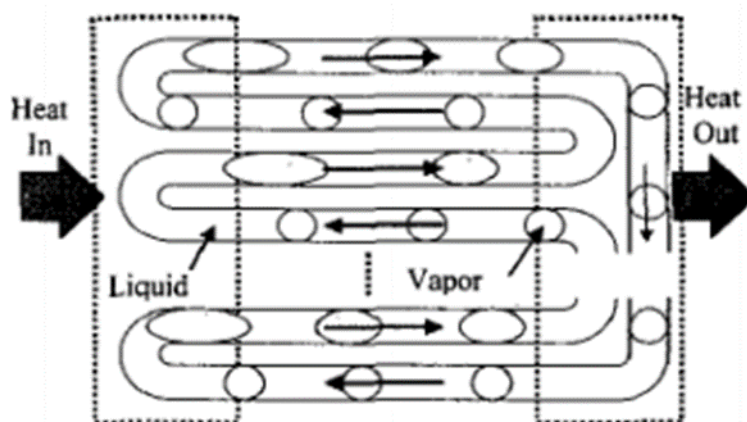
รูปที่ 2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ [8]

ท่อความร้อนแบบสั่นมีลักษณะเป็นท่อยาวคดเคี้ยวประกอบด้วย serpentine channel ที่มีขนาดเป็นแบบท่อคาปิลลารี เริ่มต้นจะทำให้สารทำงานที่อยู่ภายในท่อความร้อนแบบสั่นออกมาก่อน และจึงเติมสารทำงานเพียงบางส่วน ซึ่งทำให้แรงตึงผิวของสารทำงานเกิดเป็นแท่งของเหลวสลับกับฟองไอ เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหย สารทำงานจะเริ่มระเหยทำให้แรงดันไอเพิ่มขึ้นภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้ฟองไอในส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นและผลึกของเหลวที่เหลือไปยังส่วนควบแน่น ความเย็นของส่วนควบแน่นจะทำให้แรงดันไอลดลงและเกิดการควบแน่นของฟองไอ ในกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบสั่นภายในท่อ รูปที่ 3 แสดงภาพจำลองของท่อความร้อนแบบสั่นวรูป [9]



รูปที่ 3 แสดงภาพจำลองของท่อความร้อนแบบสั่น [9]

Akashi [1] ได้อธิบายหลักการพื้นฐานของท่อความร้อนแบบสั่นว่า เมื่อปลายโค้งของกลุ่มท่อคาปิลลารีมีอุณหภูมิต่ำ สารทำงานภายในท่อจะเกิดการระเหยและเพิ่มแรงดันไอซึ่งทำให้เกิดฟองในส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นเพื่อผลึกของเหลวที่เหลือไปยังส่วนควบแน่น การควบแน่นที่ส่วนควบแน่นมีอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันมากขึ้น เพราะทั้งสองส่วนนี้เชื่อมต่อกัน การทำงานแบบนี้ทำให้เกิดการสั่นของฟองไอและแท่งของเหลวในทิศทางตามแนวแกน ส่วนความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับแรงเฉื่อยของการไหลและอัตราส่วนของมวลน้ำภายในท่อ [10] เพื่อให้การทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นสมบูรณ์แท่งของเหลวและฟองไอจะต้องไหลออกจากเดียวกันภายในท่อคาปิลลารีตลอดความยาวท่อ ดังนั้นจึงต้องทำให้ท่อความร้อนเป็นสุญญากาศก่อน จากนั้นเติมสารทำงานเข้าไปบางส่วน แท่งของเหลวและฟองไอจะมีทิศทางไหลออกจากเดียวกัน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อไม่เกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในวิกฤต สำหรับสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการเชื่อมต่อกันในจุดที่มีกลุ่มของท่อคาปิลลารีคดโค้งขนานกัน [11]



รูปที่ 4 หลักการพื้นฐานของท่อความร้อนแบบสั่น [11]

ลักษณะของท่อความร้อนแบบสั่นเมื่อเทียบกับท่อความร้อนแบบดั้งเดิม

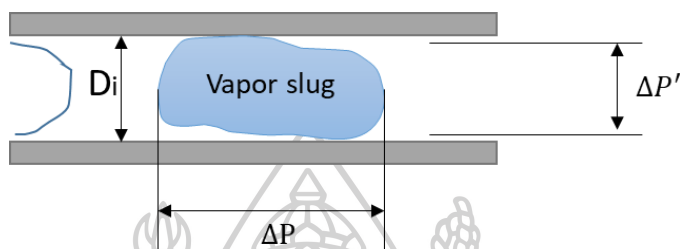
- ความดันของสารทำงานมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากสารทำงานส่วนใหญ่หรือทั้งหมดไม่ได้ไหลผ่านโครงสร้างแบบวัสดุพอรุน
- ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง ต้นทุนการผลิตต่ำเพราะไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างแบบวัสดุพอรุน
- ความดันของของเหลวจะมีค่าลดลงเนื่องจากความฝืดของการไหลของฟองไอจะไปลดการไหลของฟองไอเช่นเดียวกับการไหลของเหลว
- เนื่องจากแรงขับจากการได้รับความร้อน ทำให้เกิดการไหลแบบสั่น และส่งผลให้มีช่องว่างที่ผิวเกิดเป็นฟิล์มบางและช่วยเพิ่มการระเหยและการควบแน่นของการถ่ายเทความร้อน
- ความร้อนที่เพิ่มขึ้นในส่วนทำระเหยจะถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนและเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเนื่องจากการไหลแบบสั่นในท่อคาปิลลารี [13]

2.2 การออกแบบชุดทดลองหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

ในการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึงนั่นคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเนื่องจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นจะมีผลต่อการเกิดสถานะของสารทำงานภายในท่อ โดยสถานะที่เกิดขึ้นนั่นคือ ฟองไอ (Vapor plug) และ แท่งของเหลว (Liquid slug) แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งจะมีผลต่อการไหลและการทำงานของท่อความร้อนแบบ

สั้นวงรอบตั้งนั้นในการคำนวณหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนที่เหมาะสมกับการเกิดฟองไอและแท่งของเหลวจะเป็นไปตามสมการที่ 1

$$D_i \leq 2 \left(\frac{\sigma}{\rho g} \right)^{0.5} \quad (1)$$



รูปที่ 5 การเกิดฟองไอสลับกับแท่งของเหลวในท่อคาปิลลารี [2]

โดยที่

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทดลอง หน่วย mm

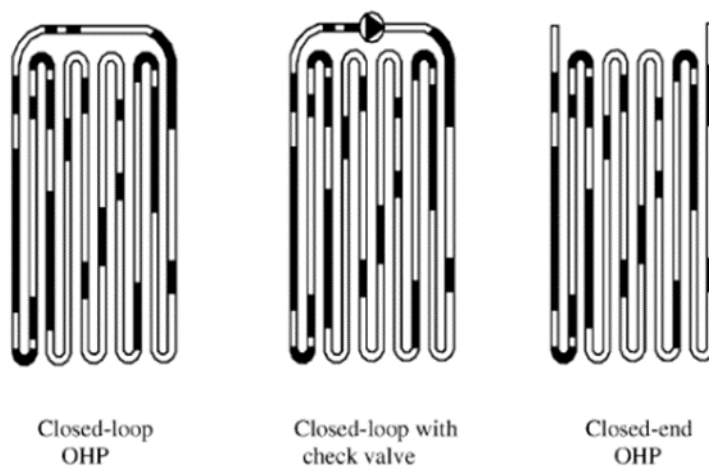
σ คือ ค่าแรงตึงผิว หน่วย N/m

ρ คือ ความหนาแน่น หน่วย Kg/m^3

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง หน่วย m/s^2

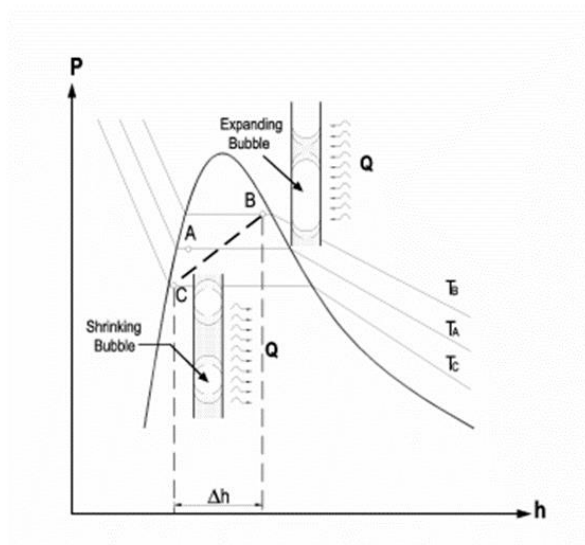
Akachi [1] ได้อธิบายเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั้นว่า ท่อความร้อนแบบสั้นเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ข้อดีคือ ท่อความร้อนแบบสั้นจะตอบสนองต่อความร้อนได้ไว ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามท่อความร้อนแบบสั้นยังมีข้อเสียนั้นคือ ท่อความร้อนแบบสั้นไม่สามารถทำงานได้ในตำแหน่งรูปแบบอื่นๆ

ท่อความร้อนแบบสั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (Cosed-loop ohp) ซึ่งปลายของท่อเชื่อมต่อกันเป็นวงปิด ชนิดต่อมาคือ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีวาล์วกันกลับ (Closed-loop with check valve) ซึ่งทำให้สารทำงานเคลื่อนที่ในทิศทางจำเพาะเจาะจง และชนิดสุดท้ายคือ ท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (Closed-end ohp) ซึ่งมีปลายปิดทั้งสองด้าน [12] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชนิดของท่อความร้อนแบบสั้น [12]

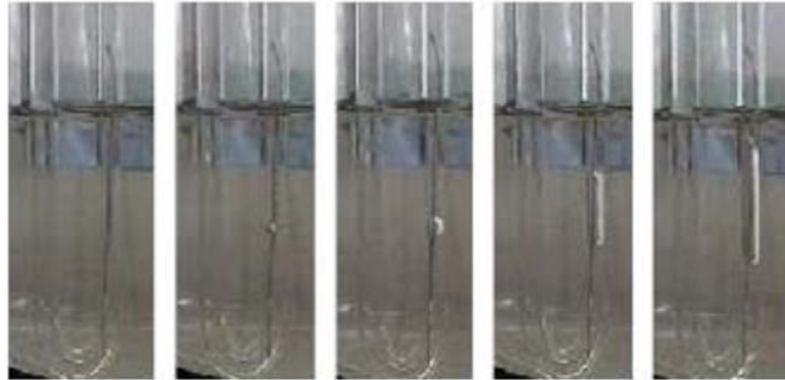
สำหรับในกรณีเมื่อท่อความร้อนแบบสั้นมีอุณหภูมิคงที่ สถานะของเหลวและฟองไอของท่อความร้อนแบบสั้นจะอยู่ในสภาวะเสถียรที่ความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าเอนทาลปีของท่อความร้อนแบบสั้น [13] จุด A แทนสถานะกลางทางเทอโมไดนามิกส์ของท่อความร้อนแบบสั้น ในระหว่างการทำงานจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นทำให้เกิดสภาวะความดันไม่เสถียร และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนทำระเหยและมีฟองไอเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะเคลื่อนไปยังจุด B โดยอาศัยแรงดันและอุณหภูมิที่สูงกว่าที่จุด A ในการเคลื่อนที่ ทำให้ของเหลวไหลไปยังส่วนควบแน่น ในขณะที่ส่วนควบแน่นอยู่ในตำแหน่งปลายตรงข้ามของท่อความร้อนแบบสั้นเพื่อช่วยให้เกิดความดันแตกต่างระหว่าง 2 จุด เป็นแรงผลักดันให้จุด A เคลื่อนไปยังจุด C ที่มีความดันและอุณหภูมิต่ำกว่า ส่งผลให้เกิดสภาวะไม่เสถียรของแรงขับเคลื่อนทางความร้อน นอกจากนี้ระบบจะทำให้ความดันภายในกลับคืนสู่สภาวะคงตัว เนื่องจากการเชื่อมต่อกันภายในของท่อทำให้การเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวและฟองไอในส่วนควบแน่นเคลื่อนที่ไปยังส่วนทำระเหย การทำงานร่วมกันระหว่างแรงขับและแรงคืนสภาพนำไปสู่การสั่นของฟองไอและแท่งของเหลวในทิศทางตามแนวแกน อย่างไรก็ตามการทำงาน ofท่อความร้อนแบบสั้นอยู่ในสภาวะแรงดันเสถียรและต่างจากท่อความร้อนแบบเดิม



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับค่าเอนทาลปีของท่อความร้อนแบบสั้น

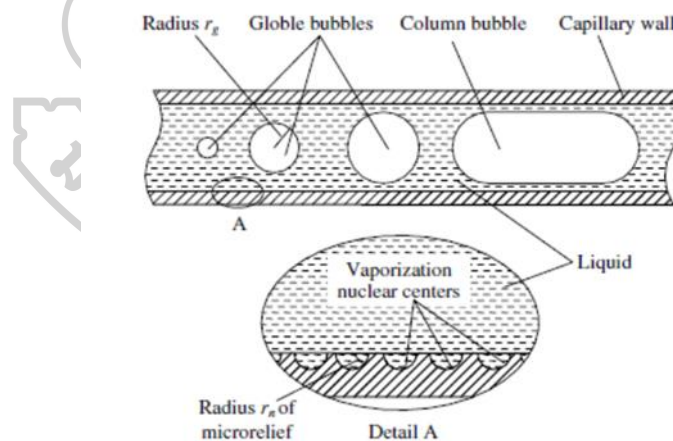
2.3 ลักษณะการเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบสั้น

ลักษณะการเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นมีความสำคัญในการพัฒนารูปแบบการสั้นอย่างเสถียรและมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์ โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ สภาวะของผิวผนังท่อ การระเหยในส่วนทำระเหย ความหนาแน่นความร้อน สมบัติทางกายภาพของสารทำงาน การเพิ่มขึ้นของฟองไอและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อคาปิลลารี เป็นต้น ซึ่ง Qu et al.[14] ได้นำเสนอทฤษฎีและวิเคราะห์การเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานและสามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นได้ดียิ่งขึ้น โดยการทดลองใช้ท่อความร้อนแบบสั้นชนิดแก้วและใช้น้ำเป็นสารทำงานทำให้เห็นลักษณะการเกิดของฟองไภายในท่อความร้อนแบบสั้น เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากอ่างน้ำร้อนทำให้สารทำงานคงที่แต่จะมีฟองไเล็กๆเริ่มเกิดขึ้นในบางช่วงของผนังท่อ จากนั้นฟองไจะมีขนาดและมีจำนวนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 แสดงลักษณะของฟองไภายในท่อความร้อนแบบสั้น [14]



รูปที่ 8 แสดงลักษณะของฟองอากาศภายในท่อความร้อนแบบเส้น [14]

รูปที่ 9 แสดงลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะด้วยกันคือ ฟองแบบวงกลมเล็ก (globe) และฟองแบบคอลลัมน์ยาว (Taylor) และจะไหลเวียนภายในท่อความร้อนแบบเส้น เมื่อมีความร้อนเพิ่มขึ้นที่ส่วนทำระเหย ฟองแบบวงกลมเล็ก จะถูกกระตุ้นได้ง่ายและมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในมวลของน้ำมากกว่าฟองแบบคอลลัมน์ยาว ดังนั้นบริเวณผิวเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันอากาศภายในท่อความร้อนแบบเส้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟองอากาศและแท่งของเหลวภายในท่อ



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของฟองอากาศแบบ Globe และ Column [14]

Qu et al. [14] ได้สรุปช่วงเริ่มต้นการทำงานของท่อความร้อนแบบเส้น และการสันแบบคงตัวว่ามีสาเหตุหลักมาจากการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับเงื่อนไขดังนี้

- ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังของท่อคาปิลลารีและสำหรับฟองอากาศในส่วนทำระเหยต้องมีค่ามากพอเพื่อเพิ่มจำนวนของฟองอากาศ

- ความดันไอในส่วนทำระเหยจะต้องมีค่ามากพอเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟองไอและแท่งของเหลว ความแตกต่างของความดันระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นต้องมีค่ามากพอเพื่อเอาชนะความดันไอรวมที่ลดลงในท่อคาปิลลารี
- หลังจากท่อความร้อนแบบสั่นเริ่มทำงาน การทำงานจะขึ้นอยู่กับความดันที่แตกต่างระหว่างการให้ความร้อนและการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น

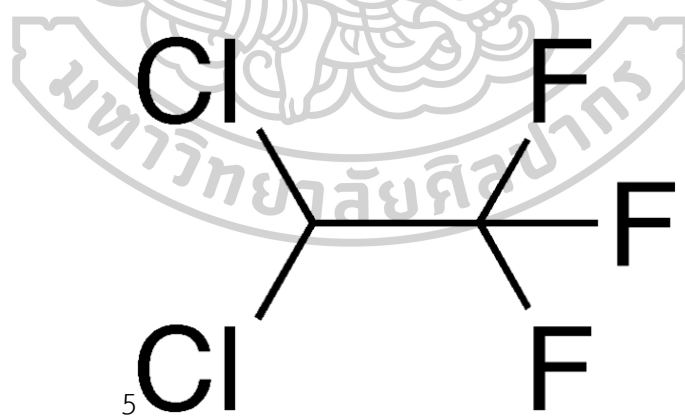
2.4 สารทำงาน

สารทำงาน คือ ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น สารทำงานจะดูดความร้อนแฝงเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอที่อุณหภูมิและความดันสูง และคายความร้อนแฝงออกเมื่อเกิดการควบแน่นสารทำงานจะเปลี่ยนสถานะจากไอกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันต่ำ สำหรับสารทำงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

2.4.1 สารทำความเย็น R-123 (2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane)

เป็นสารทำความเย็นประเภท Hydrochlorofluorocarbon (HCFC) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีค่าการทำลายโอโซนต่ำ (Low ozone depletion potential) จัดเป็นสารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสารทำความเย็นที่มีจุดทำงานที่ความดันต่ำ ทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด แสดงโครงสร้างของสารทำงาน R-123 ดังรูปที่

10

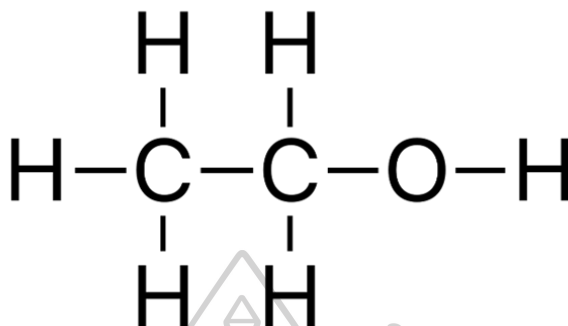


รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างของสารทำความเย็น R-123 [15]

2.4.2 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการนำเอาพืชมาหมักเพื่อเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล จากนั้นจึงเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เอนไซม์หรือกรดบางชนิดช่วยย่อย เมื่อทำให้เป็นแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% โดยการ

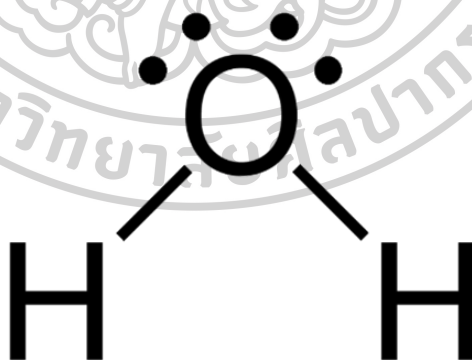
กลั่น ส่วนใหญ่ผลิตจากพืช 2 ประเภท คือ พืชประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย ปืทรูท เป็นต้น และ พืชจำพวกแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด เป็นต้น แสดงโครงสร้างของสารทำงาน เอทานอล ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างของเอทานอล [15]

2.4.3 น้ำกลั่น (Distilled water)

เป็นน้ำที่ผ่านขั้นตอนการทำน้ำให้ระเหยแล้วกลั่นตัวกลับเป็นหยดน้ำ มีความบริสุทธิ์สูง และปราศจากสิ่งเจือปน ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เป็นน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากน้ำกลั่นมีค่าสิ่งเจือปนในน้ำค่อนข้างน้อย จึงทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าในน้ำกลั่นน้อยตามไปด้วย แสดงโครงสร้างของสารทำงาน น้ำกลั่น ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างของน้ำกลั่น [15]

การเลือกใช้สารทำงานให้เหมาะสมกับต่อความร้อนแบบสันควรพิจารณาจากอุณหภูมิการทำงานของต่อความร้อนแบบสัน คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น หลังจากนั้นพิจารณาเลือกสารทำงานที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิทำงานของต่อความร้อนแบบสันที่คำนวณได้ ส่งผล

ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันมีสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดและเหมาะสมกับการทำงานนั้นๆ [15]

สมบัติของสารทำความเย็นที่ควรคำนึง

1. สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และกายภาพที่เหมาะสม
2. ความปลอดภัยที่รวมถึงความเป็นพิษ และความไวไฟ
3. ความเข้ากันได้กับวัสดุที่ใช้ในระบบ
4. ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (zero ODP, low GWP)
5. หาได้ง่ายหรือผลิตขึ้นมาง่าย

ในการวิเคราะห์ผลของสารทำงานสิ่งที่จะนำไปวิเคราะห์คือคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ เพราะว่าคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันของสารทำงานและสามารถเปรียบเทียบผลที่เกิดจากสารทำงานได้

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่มีผลต่อสารทำงานประกอบด้วย

1. ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization)
2. จุดเดือด (boiling temperature)
3. อุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature)
4. ความดันในการกลายเป็นไอ (vapor pressure)
5. ความดันควบแน่น (condensing pressure)
6. ปริมาตรจำเพาะ (specific volume)

2.5 รูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันวงรอบ

2.5.1 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่วางตัวในแนวตั้ง

สำหรับรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่ทำงานในแนวตั้งสามารถแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังนี้ [16]

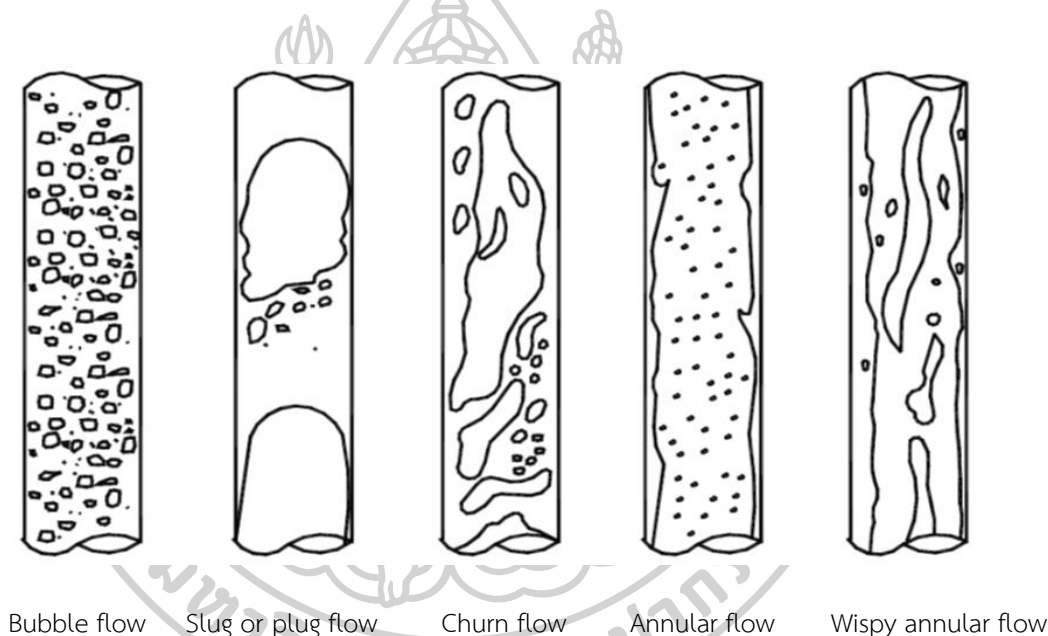
1. การไหลแบบเป็นฟอง (Bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเล็ก ๆ กระจายเป็นจุด ไหลปะปนกับของเหลว

2. การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow or plug flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซคล้ายแท่งของเหลวขึ้นด้านบน โดยมีของเหลวชั้นกลางพร้อมกับมีก๊าซปะปนบ้าง ขณะเดียวกันมีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองก๊าซรูปกระสุน

3. การไหลแบบเป็นโพรง (Churn flow) รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิดเบี้ยว เนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการไหลนี้จะไม่มีการสั่นของของเหลวเกิดขึ้นเมื่อท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ

4. การไหลแบบวงแหวน (Annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลของก๊าซอยู่ในแกนกลางของท่อความร้อน มีหยดของเหลวเล็ก ๆ ปะปน ขณะเดียวกันมีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ

5. การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของก๊าซอยู่แกนกลางท่อ โดยหยดของเหลวได้ปะปนกับก๊าซ ได้รวมตัวกันเป็นริ้วปนกันไปด้วย ขณะเดียวกันมีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งเกิดการรวมตัวของของเหลวหยดเล็ก ๆ เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย



รูปที่ 13 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวตั้ง [16]

2.5.2 รูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่วางตัวในแนวนอน

สำหรับรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนที่วางตัวในแนวนอนสามารถแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังนี้ [16]

1. การไหลแบบแยกชั้น (Stratified flow) รูปแบบการไหลจะมีการแยกตัวออกจากกัน เนื่องจากแรงดึงดูด โดยก๊าซจะไหลไปตามด้านบนของท่อ และของเหลวจะไหลไปที่ด้านล่างของท่อ

2. การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified wavy flow) รูปแบบการไหลที่มีความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบแยกชั้น ทำให้เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

3. การไหลแบบฟองฟุ้ง (Dispersed bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซกระจายปะปนในของเหลวมีแนวโน้มของฟองก๊าซจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้นฟองก๊าซจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

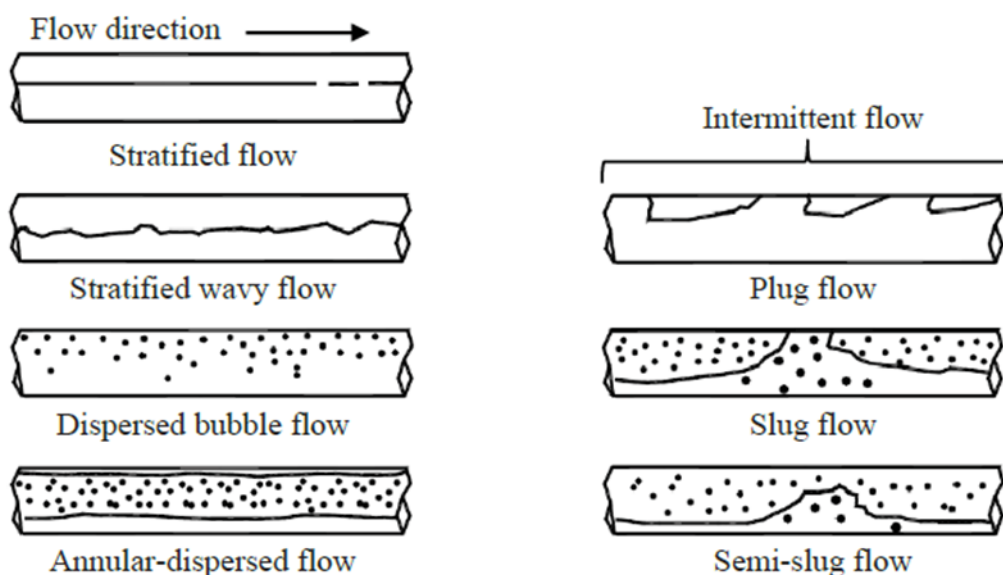
4. การไหลแบบแหวนฟุ้ง (Annular dispersed flow) รูปแบบการไหลคล้ายกับท่อที่อยู่ในแนวตั้ง แต่ความหนาของแผ่นฟิล์มจะสม่ำเสมอ โดยด้านล่างของท่อความหนาของแผ่นฟิล์มก็จะมากกว่า

5. การไหลแบบเป็นช่วง (Intermittent flow) รูปแบบการไหลนี้แบ่งออกได้ 3 รูปแบบได้แก่

5.1 การไหลแบบเป็นก้อน (Plug flow) รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อในแนวตั้ง แต่จะแนบชิดกับผิวท่อด้านบน

5.2 การไหลแบบเป็นห้วง (Slug flow) รูปแบบการไหลที่ของเหลวมีสภาพเป็นชั้นไปอุดหน้าท่อจะมีฟองก๊าซปะปนด้วย

5.3 การไหลแบบกึ่งห้วง (Semi-slug flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเกิดขึ้นที่คลื่น โดยคลื่นไม่สามารถก่อตัวเป็นก้อนเหลวไปปิดกั้นท่อหรือสัมผัสกับผนังท่อด้านบนได้



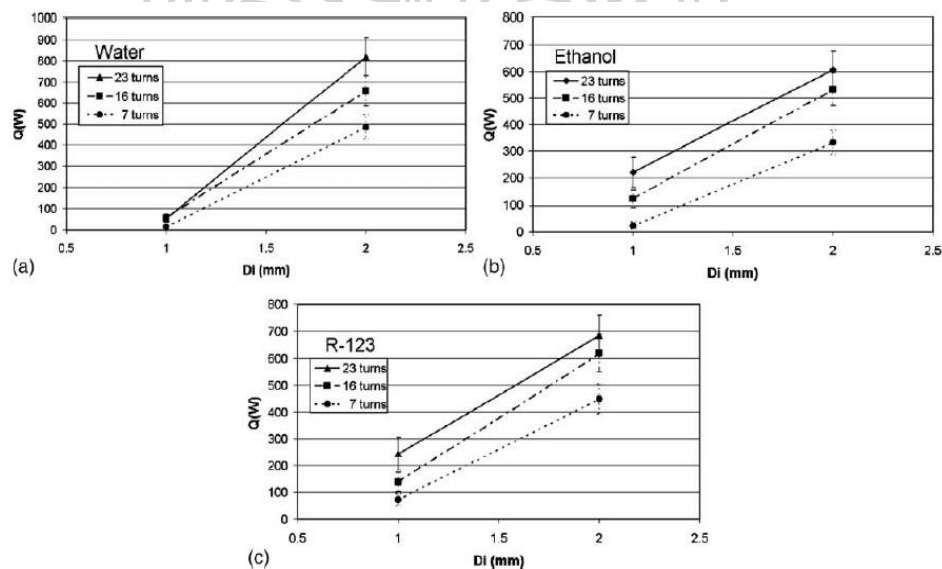
รูปที่ 14 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ [16]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานวงรอบขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว สารทำงาน มุมเอียงทดลอง เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งมีดังนี้

2.5.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

จากการศึกษาวิจัยผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนแบบสัณฐานวงรอบ พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลให้แก่สารทำงานทำให้สามารถไหลเวียนถ่ายเทความร้อนได้ดีและยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวรับความร้อนจากแหล่งความร้อนด้วยทำให้สารทำงานรับความร้อนได้มากขึ้น [17] และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยพบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะลดแรงเสียดทานความดันตกคร่อม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 15

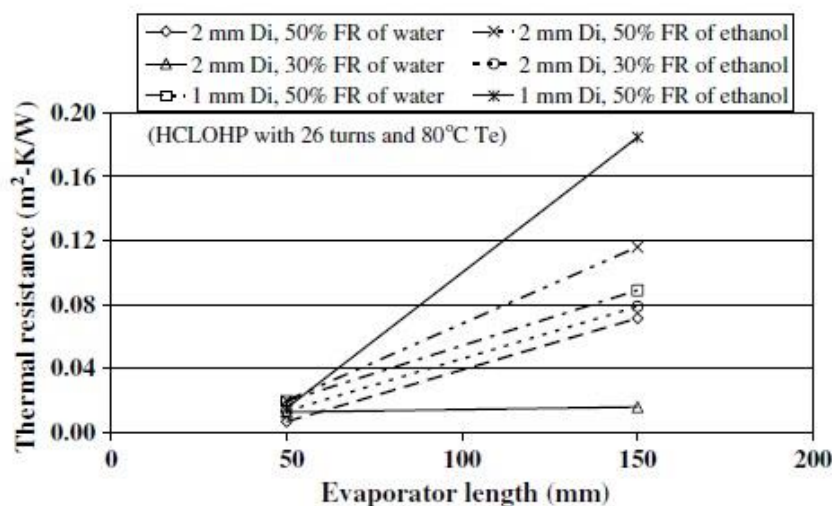


รูปที่ 15 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับค่าการถ่ายเทความร้อน

($L_e = 100$ มิลลิเมตร ทดลองในแนวตั้ง) [7]

2.5.2 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน

ความยาวส่วนทำระเหยคือความยาวของส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อน ซึ่งวัดจากปลายสุดของกลุ่มท่อด้านส่วนทำระเหยไปยังรอยต่อระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [5] ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน พบว่า เมื่อความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเกิดความดันตกคร่อมอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของสารทำงานจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นลดลง ซึ่งพบว่าความยาวส่วนทำระเหยที่เหมาะสมนั้นควรมีความยาว 50 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 16

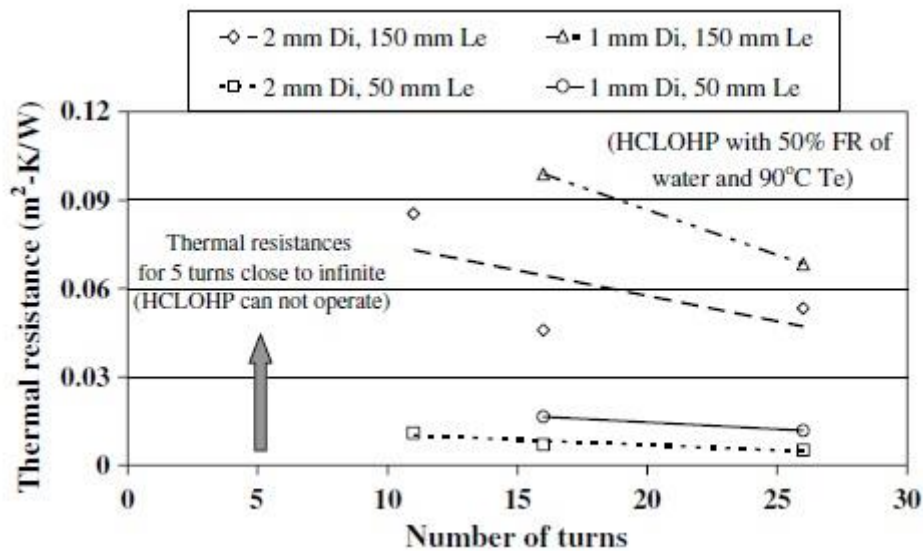


รูปที่ 16 ผลของความยาวส่วนทำระเหย [5]

2.5.3 ผลของจำนวนโค้งเกลียวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

จำนวนโค้งเกลียว คือ จำนวนของท่อความร้อนที่ขดเป็นรูปตัวยูที่เชื่อมต่อกับท่อตรงที่ขนานกันอาจจะอยู่ในส่วนทำระเหยหรือส่วนควบแน่นก็ได้ ซึ่งถ้าจำนวนโค้งเกลียวเพิ่มขึ้น ก็หมายความว่า ความยาวรวมของท่อยาวขึ้นนั่นเอง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า เมื่อจำนวนโค้งเกลียวเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะลดลง จากรูปที่ 17 แสดงผลของจำนวนโค้งเกลียวโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 และ 2 มิลลิเมตร สารทำงานใช้น้ำและเอทานอล ทดสอบที่อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส ทดสอบที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 และ 150 มิลลิเมตร พบว่า ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร เมื่อจำนวนโค้งเกลียวเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะค่อยๆลดลง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร เมื่อจำนวนโค้งเกลียวเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะลดลงอย่างมาก โดยจำนวนโค้งเกลียวที่เหมาะสมที่สุดเกิดขึ้นที่ 26 โค้งเกลียว [18] เพราะการเพิ่มขึ้นของจำนวนโค้งเกลียวทำให้เกิด

ความดันไม่สมดุลของการไหลระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนโค้งเลี้ยวน้อยที่สุด 5 โค้งเลี้ยว ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบวางตัวในแนวนอน ไม่สามารถทำงานได้ และความต้านทานความร้อนจะสูงถึงค่าระยะอนันต์



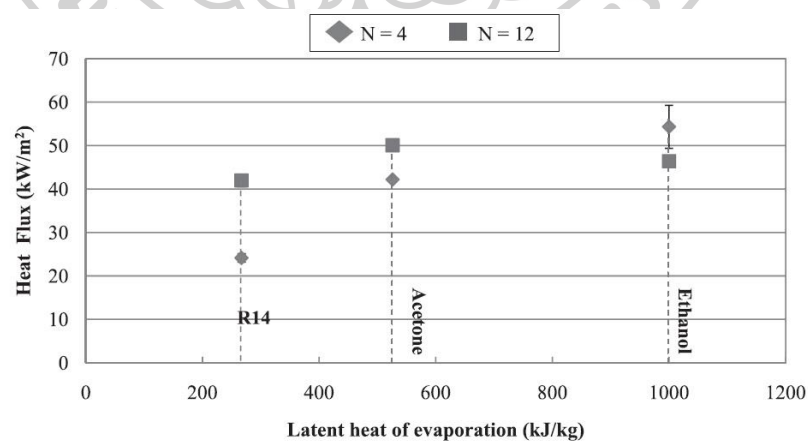
รูปที่ 17 อิทธิพลของจำนวนโค้งเลี้ยว [5]

2.5.4 ผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน

มุมเอียง คือ มุมที่วัดจากแนวระดับไปยังแนวตั้ง หากมุมเอียงมีค่าเป็นบวกแสดงว่าส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น แต่ถ้ามุมเอียงเป็นลบแสดงว่าส่วนทำระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่น จากการศึกษาวิจัยผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน พบว่า หากเพิ่มมุมเอียงจาก 0° ไปเป็น 90° จะมีผลการทดลองแตกต่างกัน คือ ถ้ามุมเอียงการทำงานมีค่าเป็นบวกหรือกล่าวได้ว่าส่วนทำระเหยอยู่ด้านล่างส่วนควบแน่นเราจะเรียกว่า (Bottom heat mode : BHM) เมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและจะแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นและอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นแบบคงตัว ส่วนถ้ามุมเอียงการทำงานมีค่าเป็นลบหรือส่วนทำระเหยอยู่ด้านบนส่วนควบแน่น เมื่อมุมเอียงการทำงานเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากการที่ส่วนให้ความร้อนแก่สารทำงานอยู่ด้านบนทำให้เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนแล้วเปลี่ยนสถานะก่อนจะไหลลงมาถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น และเมื่อถ่ายเทความร้อนเรียบร้อยแล้วสารทำงานจะต้องไหลขึ้นไปรับความร้อนโดยจะต้องเอาชนะแรงโน้มถ่วงโลกด้วยทำให้มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน [18]

2.5.5 ผลของสารทำงานที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน

สารทำงาน คือ ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยคุณสมบัติของสารทำงานที่นิยมนำมาวิเคราะห์มีดังนี้ ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ของของเหลว แรงตึงผิว พื้นผิวสัมผัส ค่าความร้อนจำเพาะ เป็นต้น โดยงานวิจัยที่ผ่านมา [19] ทำการศึกษาผลของสารทำงานโดยทดลองใช้ท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย ความยาวส่วนกันความร้อนและความยาวส่วนควบแน่นคือ 50 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 4 และ 12 โค้งเลี้ยวใช้สารทำงานคือ R141b ($h_{fg} = 267$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม) อาซิโตน ($h_{fg} = 526$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม) และ เอทานอล ($h_{fg} = 1000$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม) พบว่า คุณสมบัติของสารทำงานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ จากรูปที่ 18 แสดงผลของค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่มีต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ พบว่า ที่จำนวนโค้งเลี้ยว 4 โค้งเลี้ยว เมื่อค่าความร้อนแฝงเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 24, 42 และ 54 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เนื่องจากค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นอัตราการระเหยและอัตราการควบแน่นจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าวัดจำนวนโค้งเลี้ยว 12 โค้งเลี้ยว พบว่า เมื่อสารทำงานเปลี่ยนจาก R141b ไปเป็นอาซิโตนค่าความหนาแน่นความร้อนจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนจากอาซิโตนไปเป็นเอทานอลจาก 41 เป็น 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ค่าความหนาแน่นความร้อนลดลงจาก 50 ไปเป็น 46 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เนื่องจากคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานอื่น แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นไม่ได้หมายความว่าสมรรถนะทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเสมอ

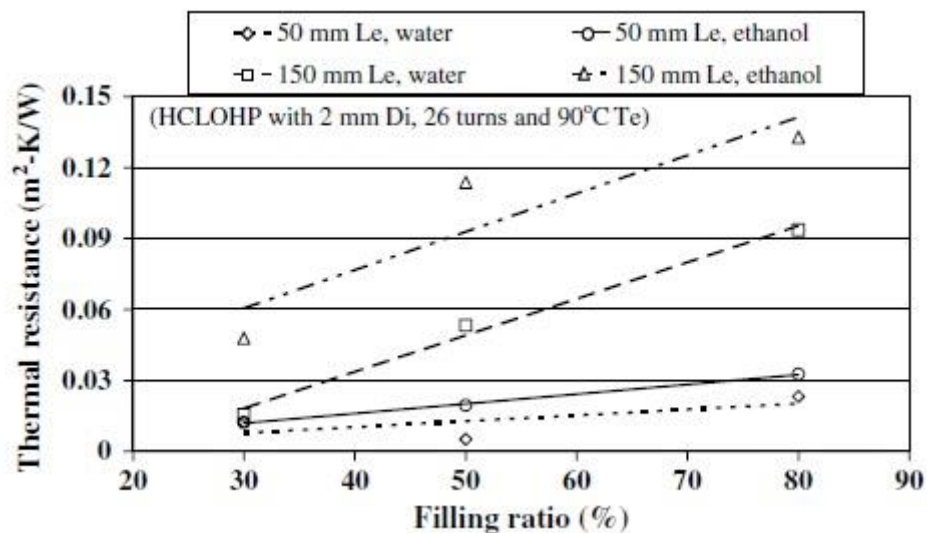


รูปที่ 18 ผลของความร้อนแฝงกับค่าความหนาแน่นความร้อน [19]

(VCLOHP Di = 2.03 มม , Le = 50 มม ทดลองในแนวตั้ง)

2.5.6 ผลของอัตราส่วนการเติมที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

อัตราส่วนการเติมสารทำงานคืออัตราส่วนของปริมาตรสารทำงานต่อปริมาตรภายในของท่อความร้อนทั้งหมดจะส่งผลต่อคุณลักษณะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยอัตราส่วนการเติมสารทำงานเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงขึ้นอยู่กับขนาดของความยาวส่วนทำระเหยและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ได้ทดลองท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 26 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 และ 150 มิลลิเมตร อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนการเติม 30% ไปจนถึง 80% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด ผลการทดลองพบว่า ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมคือ 30% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเติมคือ 30% และ 50% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเติมจาก 30% ไปยัง 80% ไม่มีนัยสำคัญดังนั้นจึงใช้เหตุผลเดียวกันกับความยาวส่วนระเหย 150 มิลลิเมตร เนื่องจากความหนืดทางจลน์ (ความเค้นเฉือนของการเสียดทานที่พื้นผิว) ของสถานะของเหลวมีค่าสูงกว่าสถานะฟองไอ ทำให้สารทำงานไหลได้ง่ายกว่า แสดงดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงผลของอัตราส่วนการเติมกับค่าความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่ [5]

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเรื่อง “สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่แหล่งรับความร้อนสองแหล่ง” มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

- 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย
- 3.2 สถานที่ทำการทดลอง
- 3.3 การวางแผนการทดลอง
- 3.4 ขั้นตอนการทดลอง
- 3.5 การวิเคราะห์ผลและการสรุปผลงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ท่อคาปิลลารี (Capillary tube)

ท่อคาปิลลารีเป็นท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่ออย่างน้อย 3 ค่า) โดยนำมาขดตามการออกแบบให้เป็นท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) ใช้สำหรับบรรจุสารทำงาน แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ท่อคาปิลลารีทองแดง (Heat pipe)

3.1.2 สารทำงาน (Working fluid)

สารทำงานที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด คือ เอทานอล น้ำ และ R-123 (เอทานอล ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ 1,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม) (น้ำกลั่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม) และ (R123 ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ 161 กิโลจูลต่อกิโลกรัม) ดังแสดงในรูปที่ 21



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 21 แสดงสารทำงานที่ใช้ในงานวิจัย (ก) เอทานอล (ข) น้ำกลั่น และ (ค) R123

3.1.3 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

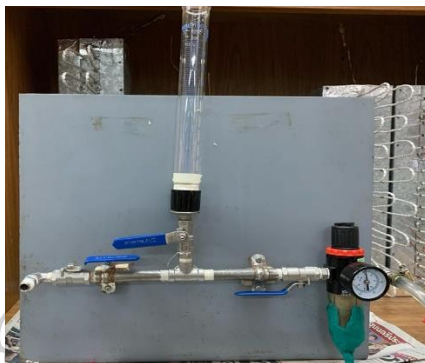
ในการทดลองเราใช้ปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ LabTech series VP ใช้ไล่อากาศออกจากท่อทองแดงทำให้ท่อทองแดงอยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยปั๊มสุญญากาศจะเชื่อมต่อเข้ากับชุดเติมสารทำงาน แสดงดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

3.1.4 ชุดเติมสารทำงาน

ประกอบด้วย ball valve ขนาด 2 นิ้ว ทั้งหมด 3 ตัว ท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน 2 นิ้ว ข้ออ 2 นิ้ว 2 ตัว ข้อต่อสามทาง 1 ตัว ขนาด 2 นิ้ว นิมเบิลขนาด 2 นิ้ว 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงชุดเติมสารทำงาน

3.1.5 แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)

แคลมป์มิเตอร์ คือ เครื่องมือทางไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในขณะที่ทำการวัด โดยพื้นฐานหลักการทำงานจะใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้ตรวจการเชื่อมต่อของลวดนิเกิล-โครเมียม ที่พันรอบท่อความร้อนเพื่อป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ใช้ แคลมป์มิเตอร์รุ่น Kewtech KT203 แสดงดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter) รุ่น Kewtech KT203

3.1.6 หน้าจอแสดงอุณหภูมิ (Temperature display)

เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ แสดงผลด้วยตัวเลข LED สีแดง จำนวน 4 หลัก มองเห็นได้ในระยะไกล ซึ่งนำมาต่อกับสาย เทอร์โมคัปเปิล เข้ากับ Temperature Display ดังแสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 Temperature Display

3.1.7 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)

ใช้สำหรับบันทึกค่าอุณหภูมิในจุดต่างๆที่ต้องการทราบได้โดยอัตโนมัติโดยผ่านสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple) โดย Data logger ที่ใช้เป็นของ Graphtec ซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิ ตั้งแต่ -270 ถึง 2000 องศาเซลเซียส จำนวนช่องการวัด 20 ช่อง และสามารถวัดค่าความชื้นและค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ แสดงดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)

3.1.8 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermo couple)

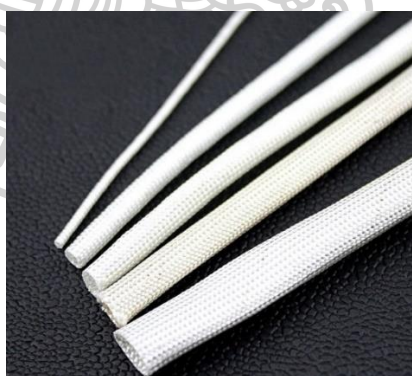
เป็นสายที่ใช้กับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ โดยจะรับค่าอุณหภูมิจากจุดต่างๆที่ต้องการจะทราบค่าแล้วส่งข้อมูลไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติแล้วแสดงที่หน้าจอแสดงผล โดยสามารถวัดอุณหภูมิ Type K ได้ตั้งแต่ -40 ถึง 1200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermo couple)

3.1.9 ปลอกสายทนความร้อน (Heat Treated Fiberglass Sleeving)

ปลอกสายทนความร้อนใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับหุ้มรอบท่อคาปิลลารีทองแดง เพื่อไม่ให้ลวดความร้อนนิกเกิล-โครเมียมสัมผัสกับท่อคาปิลลารีทองแดงโดยตรง เพื่อไม่ให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร โดยงานวิจัยนี้ใช้ปลอกสายทนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 ปลอกสายทนความร้อน (เทปใยแก้ว)

(ที่มา : <https://www.songthamelec.com/product/2706/>)

3.1.10 ลวดนำความร้อนนิกเกิล-โครเมียม (nickel chromium wire)

ลวดนำความร้อนนิกเกิล-โครเมียม ประกอบด้วย นิกเกิล 80% และโครเมียม 20% มีลักษณะเป็นลวดกลม มีคุณสมบัติเหนียว ความต้านทานสูง และเสียรูปได้ยาก โดยงานวิจัยนี้ใช้ลวดความร้อนนิกเกิล-โครเมียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ลวดนำความร้อนเมื่อทำการป้อนไฟ ลวดจะเกิดความร้อนเป็นสีแดง ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ชุดท่อทองแดง ดังแสดงในรูป 29



รูปที่ 29 ลวดนิโครม

(ที่มา : <https://www.walmart.com/ip/Nichrome-80-0-8mm-20-Gauge-AWG-20M-Roll-2-308-Ohms-m-Heater-Wire/287421194>)

3.1.11 แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน (hot-wire anemometer)

แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อนเป็นอุปกรณ์ใช้วัดการไหล (flow measurement) ที่นิยมใช้วัดความเร็วลมหรือวัดการไหลของอากาศจากพัดลมระบายอากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนกันกับท่อความร้อนแบบส่นวงรอบโดยงานวิจัยนี้ใช้ แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน รุ่น Testo 425 ซึ่งมีช่วงวัดอัตราการไหลและความเร็วลมตั้งแต่ 0 จนถึง 20 m/s แสดงดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน (hot-wire anemometer) รุ่น testo 425

(ที่มา : <https://www.amazon.com/Testo-Hot-Wire-Anemometer-Velocity-Temperature/dp/B008GVTkII>)

3.1.12 มัลติฟังก์ชันมิเตอร์ (Multi-Function meter)

มัลติฟังก์ชันมิเตอร์ เป็นเครื่องวัดเอนกประสงค์ที่สามารถวัดได้ทั้ง อุณหภูมิ ความชื้น และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ โดยการเปลี่ยนหัวโพรบต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้นำมัลติฟังก์ชันมิเตอร์มาทำการวัดความชื้นสัมพัทธ์ทั้งขาเข้าและออกของชุดทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ รุ่นที่ใช้เป็น Testo 435 สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -20 ถึง +50 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 มัลติฟังก์ชันมิเตอร์ (Multi-Function meter) รุ่น Testo 435
(ที่มา : <https://www.jjstech.com/0560-4351.html>)

3.1.13 พัดลมระบายความร้อน (Cooling fan)

พัดลมระบายความร้อน คือ พัดลมที่เป่าอากาศเพื่อไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบในการระบายความร้อน ขนาด 12 โวลต์ 1.3 แอมแปร์ ในการทดลองมีความเร็วลม 0.3-0.4 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 พัดลมระบายความร้อน (Cooling fan)
(ที่มา : <https://shopee.co.th/พัดลมระบายความร้อน-12v-4000rpm-7-Blade-i>)

3.1.14 แผ่นอลูมิเนียมเทปฟอยล์ (Aluminium tape foil)

แผ่นอลูมิเนียมเทปฟอยล์เป็นเทปกาวที่ผลิตจากแผ่นโลหะอลูมิเนียม ฟอยล์ เนื้อกาวมีคุณสมบัติพิเศษ และทนทานต่ออุณหภูมิที่แตกต่างได้ดี สามารถยึดเกาะกับชิ้นงานและวัสดุปิดผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นวัสดุที่ไม่เสื่อมสภาพจึงคงสภาพการใช้งานได้ยาวนาน โดยงานวิจัยนี้นำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน และกันความร้อนออกตามรอยรั่วต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 33

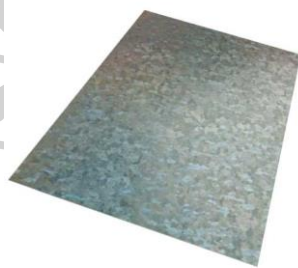


รูปที่ 33 แผ่นอลูมิเนียมเทปฟอยล์ (Aluminium tape foil)

(ที่มา : [https://www.specialisttapes.com/index.php?route=product/product & product_id=1486](https://www.specialisttapes.com/index.php?route=product/product&product_id=1486))

3.1.15 แผ่นสังกะสี

แผ่นสังกะสี หนา 0.3 มิลลิเมตร มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 ซม ยาว 40 ซม สูง 11 ซม เพื่อนำเอาไปใช้ทำกล่องของชุดทดลอง แสดงดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 แผ่นสังกะสีหนา 0.3 mm

(ที่มา : https://www.onestockhome.com/th/products/44311595/galvanized-sheet-4x8-ft_zinc-coated-sheet)

3.2 สถานที่ทำการทดลอง

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมอย่างยั่งยืน (Research and Development Center for Sustainable Engineering: RDSE) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

3.3 การวางแผนการทดลอง

การวางแผนการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นแผนการดำเนินงานโดยรวมและแผนการทดลองของงานวิจัย มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.3.1 แผนการดำเนินงาน

3.3.1.1 แปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 1.07, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร

3.3.1.2 แปรขนาดความยาวส่วนทำระเหย (Evaporator section : L_e) จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร ทั้งสองฝั่ง และขนาดความยาวส่วนควบแน่น (Condenser section : L_c) คงที่ 100 มิลลิเมตร ทั้งสองฝั่ง ไม่มีส่วนกันความร้อน

3.3.1.3 แปรจำนวนโค้งเกลียว (Number of turns) จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 16, 32 และ 40 มิลลิเมตร.

3.3.1.4 แปรสารทำงานจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น โดยมีอัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรต่อทั้งหมด

3.3.1.5 ทำการทดลองวางแนวชุดทดลองจำนวน 2 มุม ได้แก่ มุม 0 องศา (แนวนอน) และ มุม 90 องศา (แนวตั้ง)

3.3.1.6 ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัยคือ 25 ± 3 °C

3.3.1.7 เก็บข้อมูลผลการทดลองด้วยเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.8 วิเคราะห์ผลการทดลองตามตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 35.(ก-ฉ) และสรุปผลการทดลอง

Thermal resistance (K-m ² /W)						

Inner diameter (mm)

(ก)

Thermal resistance (K-m ² /W)						

Evaporator length/Condenser length (Le/Lc)

(ข)

Thermal resistance (K-m ² /W)						

Turn (turn)

(ค)

Thermal resistance (K-m²/W)

Latent heat of evaporation (KJ/Kg)

(ง)

Thermal resistance (K-m²/W)Dynamic viscosity of liquid (10⁻⁶ Pa-s)

(จ)

Evaporator temperature (°C)

Time (second)

(ฉ)

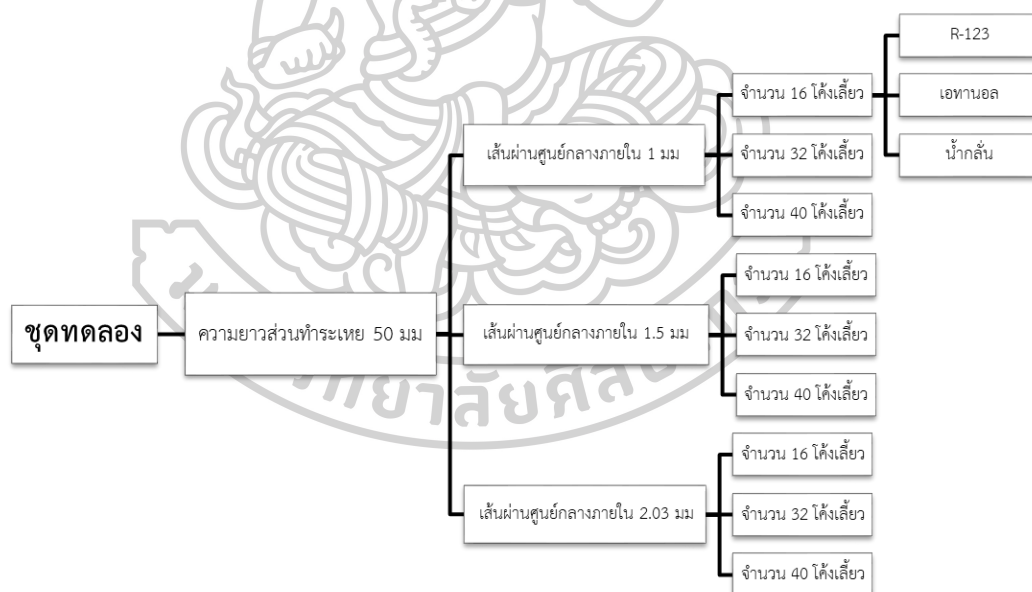
รูปที่ 35 แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลการทดลองของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

(ก) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีต่อความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่

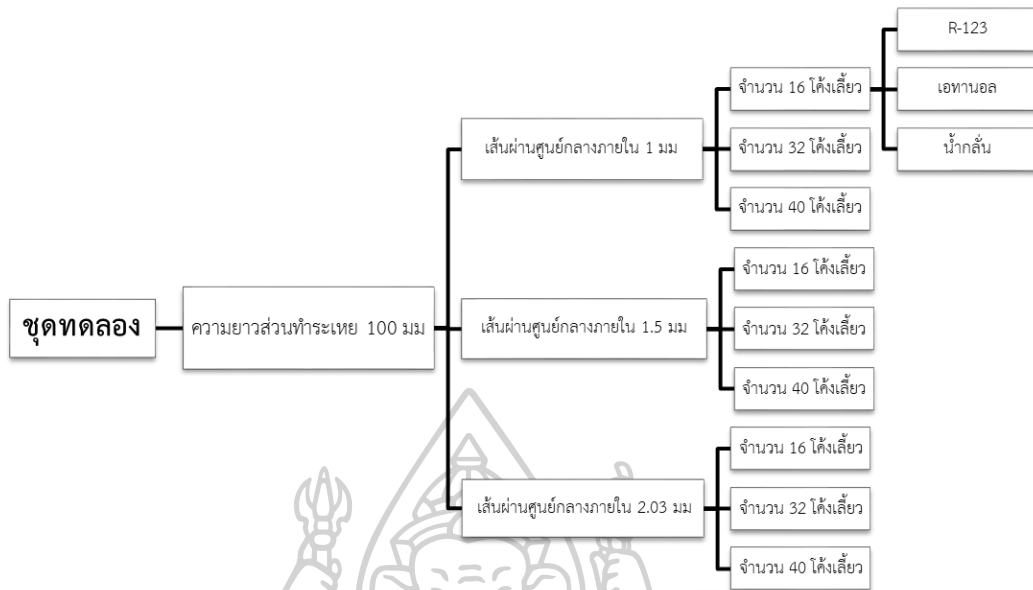
- (ข) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลของสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นที่มีต่อความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
- (ค) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลของจำนวนโค้งเลี้ยงที่มีต่อความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
- (ง) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลของความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่มีต่อความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
- (จ) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลของความหนืดจลล์ของของเหลวที่มีต่อความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
- (ฉ) แสดงรูปแบบการวิเคราะห์ผลเวลาที่มีต่ออุณหภูมิส่วนทำระเหย

3.3.2 แผนการทดลอง

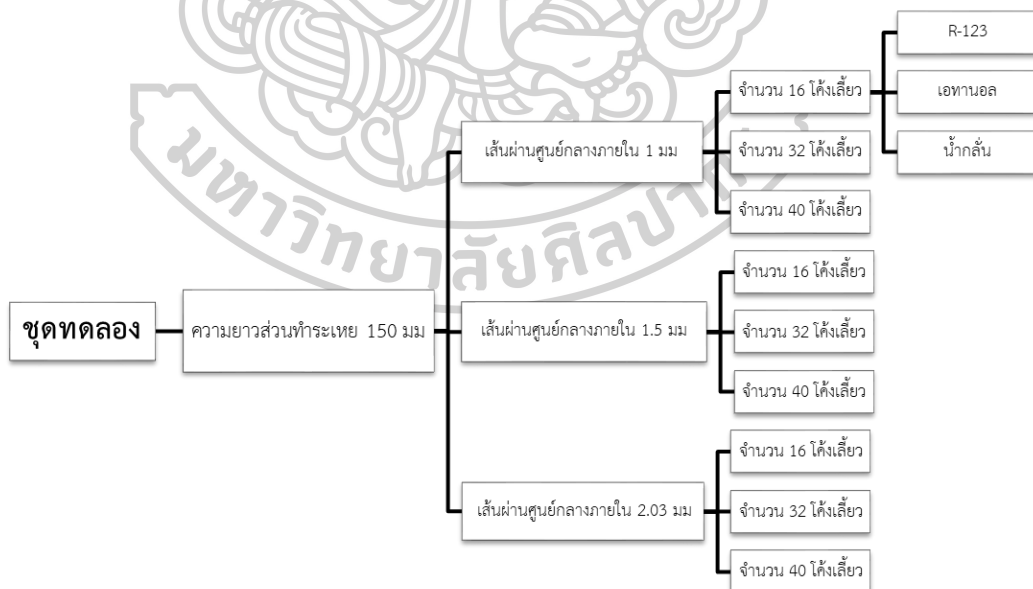
การทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง สามารถแบ่งชุดทดลองตามขอบเขตที่กำหนดได้ทั้งหมด 27 ชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 36-38



รูปที่ 36 แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 37 แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 38 แสดงชุดทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่มีแหล่งรับสองแหล่ง สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนสร้างชุดทดลอง สุ่มอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ภายในตู้ควบคุมและขั้นตอนการทดลอง ดังรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการสร้างชุดทดลอง

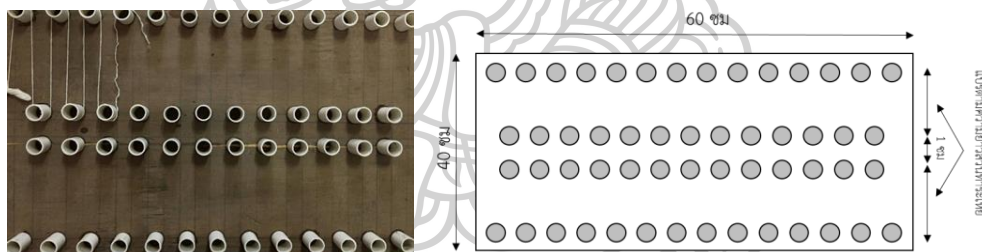
3.4.1.1 นำแผ่นไม้อัดขนาดกว้าง 40 ซม ยาว 60 ซม มาเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เพื่อใส่ท่อพีวีซีสำหรับเป็นตัวยึดการขดท่อทองแดง จำนวน 50 รู ดังแสดงในรูปที่ 39 โดยระยะห่างระหว่างแถวที่ 1 กับแถวที่ 2 และ แถวที่ 3 กับแถวที่ 4 จะเท่ากัน แปรตามความยาวส่วนทำระเหย ดังนี้

-ถ้าความยาวส่วนทำระเหยยาว 50 มิลลิเมตร ระยะห่างคือ 7.8 เซนติเมตร

-ถ้าความยาวส่วนทำระเหยยาว 100 มิลลิเมตร ระยะห่างคือ 12.8 เซนติเมตร

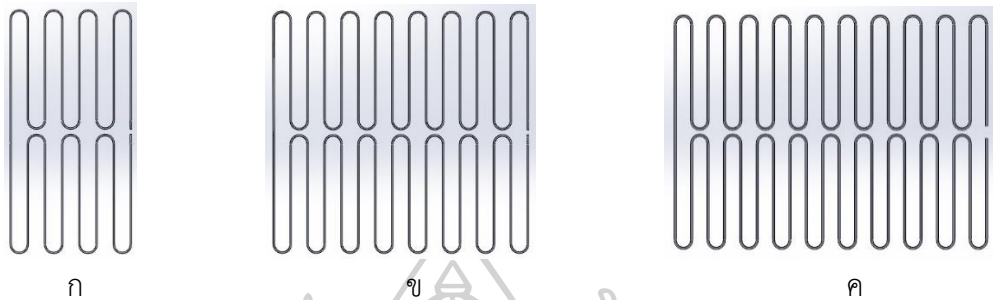
-ถ้าความยาวส่วนทำระเหยยาว 150 มิลลิเมตร ระยะห่างคือ 17.8 เซนติเมตร

3.4.1.2 นำท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ค่าได้แก่ 1.07, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร มารีดและขดเป็นวงรอบโดยใช้พีวีซียึด โดยขดเป็นโค้งเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 39



รูปที่ 39 แสดงการนำท่อทองแดงมาขดเป็นวงรอบโดยใช้พีวีซียึด

3.4.1.3 ขดท่อความร้อนให้เป็นโค้งเลี้ยว ประกอบไปด้วยจำนวนโค้งเลี้ยว 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว และความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร และความยาวส่วนควบแน่นคงที่ 50 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 แสดงการขดท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ โดยแปรความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มม. และความยาวส่วนควบแน่นคงที่ 50 มม.

ก แสดงจำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว

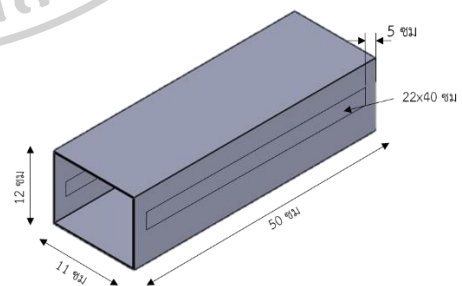
ข แสดงจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

ค แสดงจำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

3.4.1.4 นำแผ่นสังกะสีหนา 0.3 มิลลิเมตร มาตัดและพับเป็นกล่องให้ได้ขนาดความกว้าง 11 ซม. ความยาว 50 ซม. ความสูง 12 ซม. แสดงดังรูปที่ 41 (ก) หลังจากนั้นตัดชิ้นส่วนบริเวณด้านข้างที่จะประกบกับแผ่นสังกะสีที่กัดร่องออก ขนาดความกว้าง 22 ซม. ความยาว 40 ซม. ทั้งสองด้าน แสดงดังรูปที่ 41 (ข)



ก



ข

รูปที่ 41 แสดงการพับแผ่นสังกะสีเพื่อประกบกับท่อทองแดง

3.4.1.5 นำแผ่นสังกะสีมาตัดให้ได้ ขนาดความกว้าง 22 ซม ความยาว 50 ซม และ
กัตร่องให้ได้ความลึกเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อความร้อนคือ 1.94,
2.37 และ 2.93 มม ระยะร่องที่กัตห่างกัน 22 มิลลิเมตร โดยท่อความร้อน 1 ชุดการทดลอง
ใช้สังกะสีแผ่นที่ทำการกัตร่องจำนวน 2 แผ่น แสดงดังรูปที่ 42



รูปที่ 42 แสดงการนำแผ่นสังกะสีมากัตร่องเพื่อใช้สำหรับกั้นระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น

3.4.1.6 นำท่อความร้อนที่ขุดแล้วมาใส่ปลอกทนความร้อนเพื่อป้องกันความร้อน
สูญเสีย ดังแสดงในรูป 43 ส่วนที่ใส่ปลอกฉนวนใยแก้วจะเป็นส่วนที่ถูกให้ความร้อนผ่าน
ขดลวดนิโครม



รูปที่ 43 แสดงการใส่ปลอกฉนวนใยแก้วไปยังท่อความร้อน

3.4.1.7 นำกล่องแผ่นสังกะสี แผ่นสังกะสีที่กัดร่อง และท่อทองแดงที่ใส่ปลอกทนความร้อน มาประกอบกัน หลังจากนั้นพันลวดนิกเกิล-โครเมียม 80 ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่ส่วนทำระเหยบริเวณที่หุ้มปลอกทนความร้อน และติดตั้งวาล์วศรเพื่อใช้สำหรับเติมสารทำงานแสดงดังรูปที่ 44

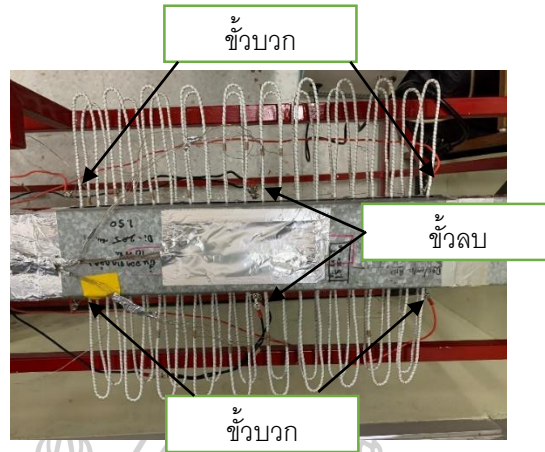
สำหรับการพันลวดนิกโครม จะแบ่งตามความยาวส่วนทำระเหยดังนี้

- ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวนลวด 20 ขดต่อ 1 โค้งเลี้ยว
- ความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร จำนวนลวด 40 ขดต่อ 1 โค้งเลี้ยว
- ความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร จำนวนลวด 60 ขดต่อ 1 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 44 แสดงการประกอบกล่องสังกะสี แผ่นสังกะสี และท่อทองแดง เชื่อมวาล์วศรเพื่อใช้เติมสารทำงาน และพันลวดนิกโครม

3.4.1.9 จากรูปที่ 43 จะมีช่องว่างอยู่เพื่อใช้ในการติดตั้งสารเทอร์โมคัมป์เปิดชนิด K ในส่วนควบแน่นซึ่งในการทดลองภายในกล่องสังกะสีจะมีลมที่คอยระบายความร้อน การติดตั้งสายเทอร์โมคัมป์เปิดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และส่วนทางเข้ากับทางออกของอากาศที่ส่วนควบแน่น บริเวณส่วนทำระเหยจะติดตั้งทั้งสองฝั่ง ฝั่งละ 4 ตำแหน่ง บริเวณส่วนควบแน่นจะติดตั้งอยู่ภายในกล่อง ฝั่งละ 4 ตำแหน่ง และติดตั้งสายเทอร์โมคัมป์เปิดบริเวณทางเข้า 2 ตำแหน่งและบริเวณทางออก 2 ตำแหน่ง รวมการติดตั้งสารเทอร์โมคัมป์เปิดทั้งหมด 20 ตำแหน่ง ข้อสำคัญในการติดตั้งสายเทอร์โมคัมป์เปิดคือจะต้องติดตั้งให้ส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นให้ตรงกันและหลังจากนั้นต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล และใช้อะลูมิเนียมเทปพอยล์ปิดช่องว่างตรงกลางด้วย เพื่อไม่ให้อากาศที่ระบายในส่วนควบแน่นไหลออกบริเวณนี้ หลังจากนั้นต่อสายไฟเข้ากับลวดนิกโครม ดังแสดงในรูปที่ 45



รูปที่ 45 แสดงการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลและการติดตั้งสายไฟเพื่อให้ความร้อน

3.4.1.10 ทำฐานตั้งชนิดปรับมุมองศาได้ สำหรับวางชุดทดลองและติดตั้งอุปกรณ์จ่ายไฟ ดังแสดงในรูปที่ 46-50



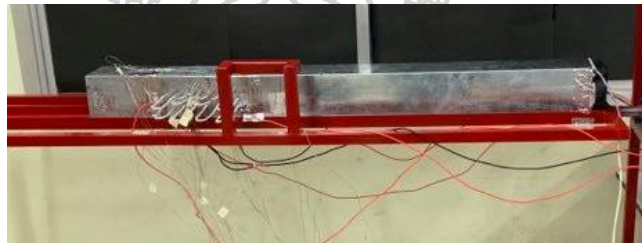
รูปที่ 46 เตรียมทำฐานตั้งชุดทดลอง



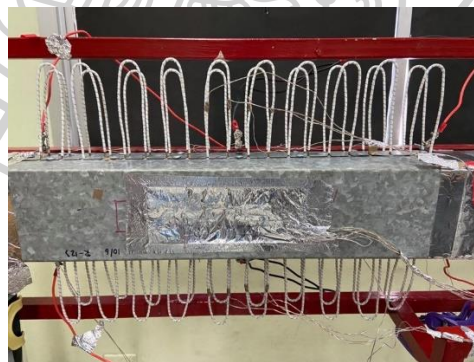
รูปที่ 47 ทำฐานตั้งชุดทดลอง



รูปที่ 48 แสดงฐานชุดทดลองและตู้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟ



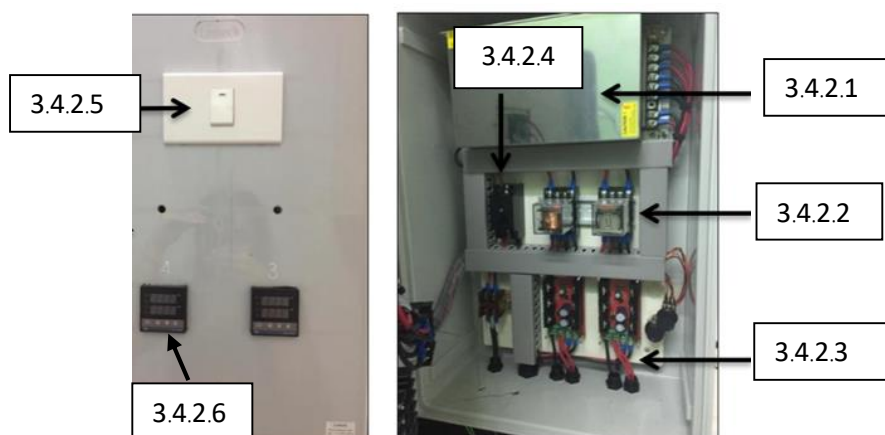
รูปที่ 49 แสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะของท่อถ่ายเทความร้อนแบบสั่นวงรอบวางแนวนอน
*หมายเหตุ เนื่องจากในการทดลองเราได้สร้างชุดฐานทดลองและตู้ควบคุมขึ้นมาใหม่ซึ่งทาสีแดง



รูปที่ 50 แสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะของท่อถ่ายเทความร้อนแบบสั่นวงรอบวางแนวตั้ง

3.4.2 อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายความร้อนให้กับชุดทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะให้ความร้อนกับชุดทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าให้ความร้อนกับลวดนิโครม โดยอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายความร้อนให้กับชุดทดลองมีดังนี้ แสดงดังรูปที่ 51



รูปที่ 51 อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายความร้อนให้กับชุดทดลอง

3.4.2.1 Switching power supply 12 V 40 A 480 W

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีค่าแรงดันแบบหนึ่ง และสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟสลับความต่างศักย์สูง ให้เป็นแรงดันไฟกระแสตรงค่าต่ำเพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ได้ จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 52



รูปที่ 52 แสดง Switching power supply 12 V 40 A 480 W

(ที่มา : <https://www.winwinpoolshop.com/product/50211/switching-power-supply->)

3.4.2.2 รีเลย์ไฟฟ้า 10 A 12 V DC

เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสคอนแทคให้เปลี่ยนสถานะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ จำนวน 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 53

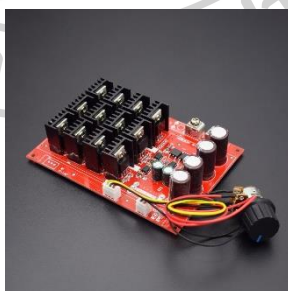


รูปที่ 53 แสดง รีเลย์ไฟฟ้า 10 A 12 V DC

(ที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/non-latching-relays/0536900/>)

3.4.2.3 DC Motor speed control 10-50 V 40 A 2000 W

เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์วงจรกระแสตรง โดยจะควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสถานะของโหลด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ จำนวน 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 54



รูปที่ 54 แสดง DC Motor speed control 10-50 V 40 A 2000 W

(ที่มา : <https://rees52.com/speed-controller/2045-dc-10-50v-60a-high-power-motor-speed-controller/>)

3.4.2.4 Safety Breaker

เบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ในการตัดวงจรไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวงจรไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ใช้ Safety breaker จำนวน 1 ตัว แสดงดังรูปที่ 55



รูปที่ 55 แสดง Safety Breaker

(ที่มา : <https://www.thianthong.com/panasonic-safety-breaker-hb-type-10a-15a-20a-30a-40a.html>)

3.4.2.5 สวิตช์ปิด-เปิดพัดลมระบายความร้อน

ควบคุมการปิด-เปิดพัดลมระบายความร้อนเมื่อเริ่มทำการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ใช้ สวิตช์ปิด-เปิดพัดลมระบายความร้อน โดยงานวิจัยนี้ใช้สวิตช์จำนวน 1 ตัว แสดงดังรูปที่ 56



รูปที่ 56 แสดง สวิตช์ปิด-เปิดพัดลมระบายความร้อน

(ที่มา : <https://www.banmor.com/product/chang>)

3.4.2.6 Temperature controller

หน้าจอแสดงผลอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการทดลองเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของระบบและชุดทดลองเกินค่าที่กำหนดไว้ โดยงานวิจัยนี้ใช้ Temperature controller display จำนวน 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 57



รูปที่ 57 แสดง Temperature controller

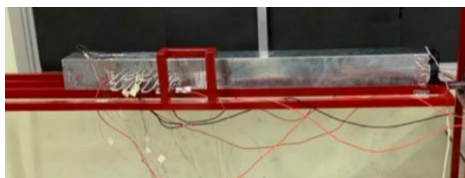
(ที่มา : lazada.co.th/products/pid-rex-c100fk02-man-i118535875.html)

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.3.1 นำชุดทดลองที่ออกแบบไว้มาทำให้เป็นสุญญากาศโดยใช้เครื่องแวคคัม ใช้เวลาในการแวคคัม ประมาณ 30-45 นาที

3.4.3.2 แต่ละชุดการทดลองจะเติมสารทำงานเริ่มจาก R-123 ก่อนและจึงเปลี่ยนเป็นเติมเอทานอล และน้ำกลั่น ตามลำดับ อัตราส่วนการเติมอยู่ที่ 50% ของปริมาตรทั้งหมด การเติมสารทำงานจะทำการทดลองจนเสร็จหนึ่งสารแล้วจึงเปลี่ยนไปจาก R-123 เป็น เอทานอล และน้ำกลั่น ตามลำดับ จนครบ 3 สารทำงาน

3.4.3.3 นำชุดทดลองมาติดตั้งบนฐานปรับระดับของเสาที่ได้จัดทำไว้ ดังแสดงในรูปที่ 58 (ก) และทำการปรับมุมตามที่กำหนดที่ตัวปรับแนวการวางของชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 58 (ข)



ก



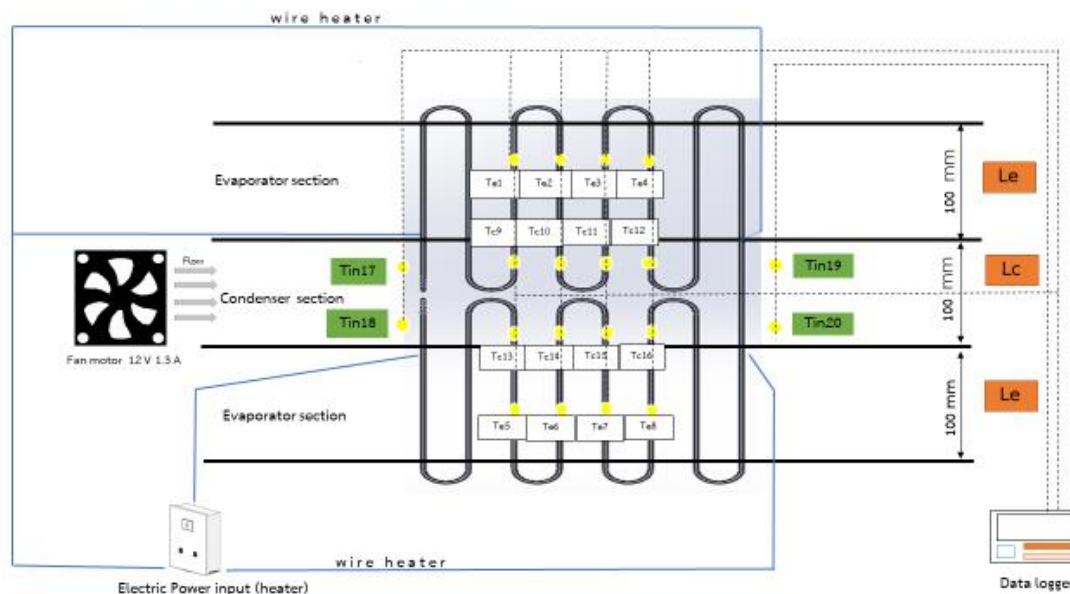
ข

รูปที่ 58 แสดงการติดตั้งชุดทดลองบนฐานปรับระดับของเสาและต่อเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟ

ก แสดงชุดทดลองติดตั้งอยู่บนฐานปรับองศา

ข แสดงตัวปรับแนวการวางของชุดทดลอง

3.4.3.4 ทำการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อบันทึกข้อมูล และนำไปวิเคราะห์โดยแผนผังการต่อจะแสดงดังรูปที่ 59

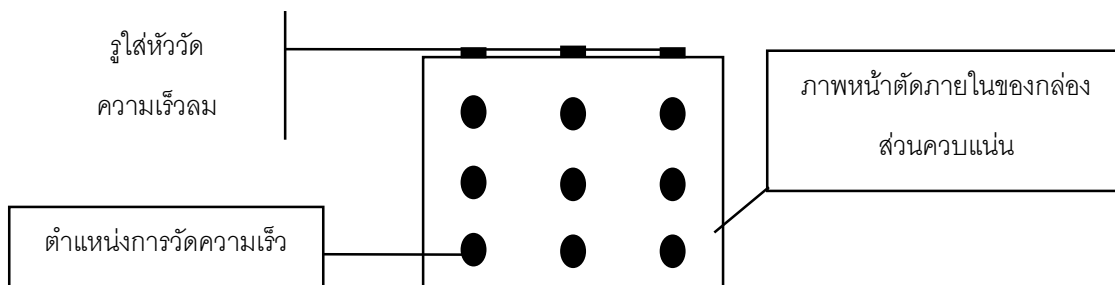


รูปที่ 59 แผนผังชุดทดลองและการต่อวัดอุณหภูมิจุดต่างๆ 20 จุด

3.4.3.5 ต่อสายไฟจากชุดอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าเข้ากับตัวชุดทดลองเพื่อความร้อนแบบ สิ้นวงรอบ หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่ชุดลดนิโครมและควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหยอยู่ที่ 40-100 องศาเซลเซียส ทั้งส่วนทำระเหยทั้ง 2 ด้าน และเปิดพัดลมในส่วนควบแน่นเพื่อ ระบายความร้อนออกจากท่อความร้อน โดยอัตราการเร็วของการไหลอากาศเท่ากับ 0.3-0.4 เมตรต่อวินาที

3.4.3.6 เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิส่วนทำระเหย ส่วน ควบแน่น อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของส่วนควบแน่น โดยตั้งค่าให้มีการบันทึกข้อมูล ทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าความเร็วลมของอากาศและค่าความชื้นของ อากาศในส่วนควบแน่นที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดลอง ตามลำดับ การวัดความเร็วลม จะใช้ Hotwire Thermo-anemometer Model testo 425 ในการวัด จากรูปที่ 60 แสดง ตำแหน่งการวัดความเร็วลมโดยจะแบ่งเป็นกริดเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำขึ้นโดยวัดทั้งหมด 9 ตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย ส่วนการวัดความชื้นจะใช้ มัลติฟังก์ชันมิเตอร์ (Multi-Function meter) รุ่น Testo 435 โดยวัดความชื้นในการทดลอง 3 ครั้งต่อการทดลอง 1 ครั้ง (30 นาที) สำหรับตำแหน่งการวัดความชื้นจะทำการเจาะรูบริเวณทางเข้าและทางออกของชุด

ทดลอง หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง จึงทำการปรับมุมจาก 0 องศา เป็น 90 องศา



รูปที่ 60 แสดงภาพหน้าตัดตำแหน่งการวัดความเร็วลมภายในส่วนควบแน่น

3.4.3.7 เมื่อทำการทดลองครบ 1 สารทำงานแล้ว จึงเปลี่ยนสารทำงานและทำการทดลอง ตามข้อที่ 3.4.3.1-3.4.3.6

3.4.3.8 หลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำค่าอุณหภูมิที่บันทึกไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ มาคำนวณหาค่าสมรรถนะทางความร้อนต่าง ๆ ของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ โดยขั้นตอนการคำนวณจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการสรุปงานวิจัย

การวิเคราะห์การทดลอง คือ การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง จากการนำเอาข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อนำมาหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความต้านทานส่วนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของอากาศระหว่างทำระเหยกับส่วนควบแน่นและนำไปวิเคราะห์ โดยสมการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทั้งหมดมีดังนี้

-สมการหาค่าการถ่ายเทความร้อน หาได้จากสมการที่ 2

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{air}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (2)$$

โดยที่

\dot{Q} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อน หน่วย W/s

h_{in} คือ ค่าเอนทัลปีต่อหน่วยมวลอากาศแห้ง ณ ทางเข้า หน่วย กิโลจูลต่อกิโลกรัม (อุณหภูมิ T_{17}, T_{18})

h_{out} คือ ค่าเอนทัลปีต่อหน่วยมวลอากาศแห้ง ณ ทางออก หน่วย กิโลจูลต่อกิโลกรัม (อุณหภูมิ T_{19}, T_{20})

-ส่วน \dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลต่อมวลอากาศแห้ง หน่วย กิโลกรัมต่อวินาที
หาได้จากสมการที่ 3

$$\dot{m}_{air} = \rho VA \quad (3)$$

โดยที่

\dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวล หน่วย กิโลกรัมต่อวินาที

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V คือ ความเร็วลมของอากาศ หน่วย เมตรต่อวินาที

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของส่วนควบแน่น หน่วย ตารางเมตร

-ค่าหนาแน่นความร้อนหาได้จากการนำสมการที่ 2 มาหารด้วยพื้นที่ที่ส่วนควบแน่น
จะได้สมการที่ 4

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_{cond}} \quad (4)$$

โดยที่

\dot{q} คือ ค่าความหนาแน่นความร้อน หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร

A_{cond} คือ พื้นที่ส่วนที่ระบายความร้อน หรือพื้นที่ส่วนควบแน่น หน่วย ตารางเมตร

-การหาค่าพื้นที่ส่วนควบแน่น หาจากสมการที่ 5

$$A_{cond} = \frac{((\text{พื้นที่ส่วนท่อโค้ง}) + (2 \times \text{พื้นที่ส่วนท่อตรง})) \times \text{จำนวนโค้งเฉลี่ย}}{10000} \quad (5)$$

$$A_{cond} = \frac{((\pi^2 \times D_o \times r_a) + (2 \times \pi \times D_o \times L)) \times \text{Turn}}{10000}$$

โดยที่

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก หน่วย มิลลิเมตร

r_a คือ รัศมีความโค้งของท่อ หน่วย มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้มีค่า 11 มิลลิเมตร

L คือ ความยาวท่อตรงในส่วนควบแน่น หน่วย มิลลิเมตร

-ค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หาได้จากสมการที่ 6

$$R = \frac{(T_{e,ave} - T_{c,ave})}{\dot{q}} \quad (6)$$

โดยที่

R คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หน่วย เคนวิน-ตารางเมตรต่อวัตต์

$T_{e,ave}$ คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยเฉลี่ยในทุกตำแหน่งการวัด หน่วย องศาเซลเซียส

$T_{c,ave}$ คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นเฉลี่ยในทุกตำแหน่งการวัด หน่วย องศาเซลเซียส



บทที่ 4

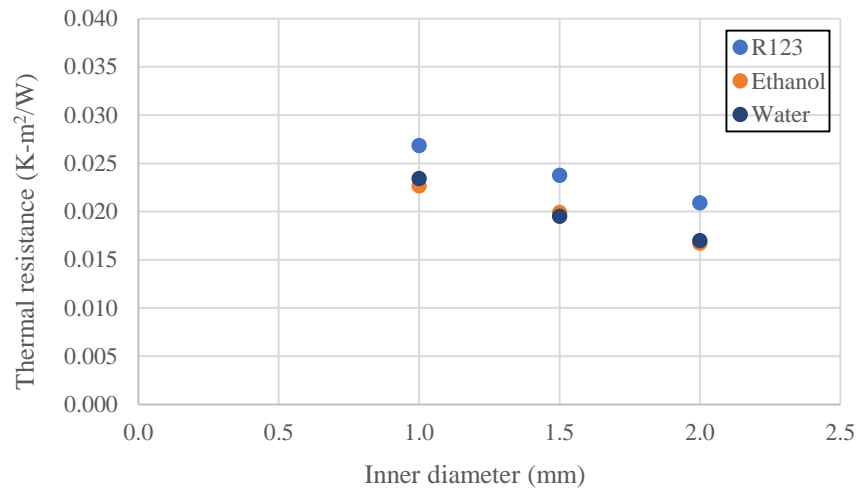
ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยทำการแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว ชนิดสารทำงาน และมุมเอียงการทำงานของท่อความร้อนในแนวตั้งและแนวนอน สำหรับการนำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ผลนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ตามมุมเอียงการทำงานของท่อความร้อนคือ มุมเอียงการทำงานในแนวตั้งและแนวนอน ดังนี้

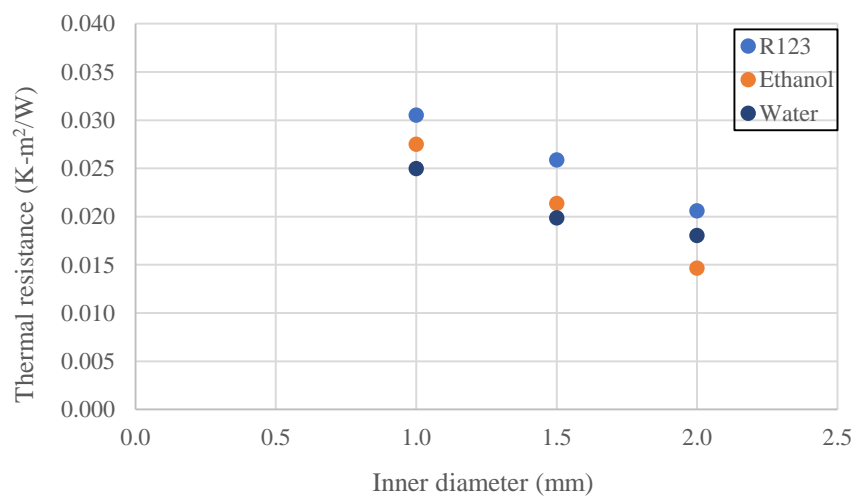
4.1 สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่วางตัวในแนวตั้ง

4.1.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

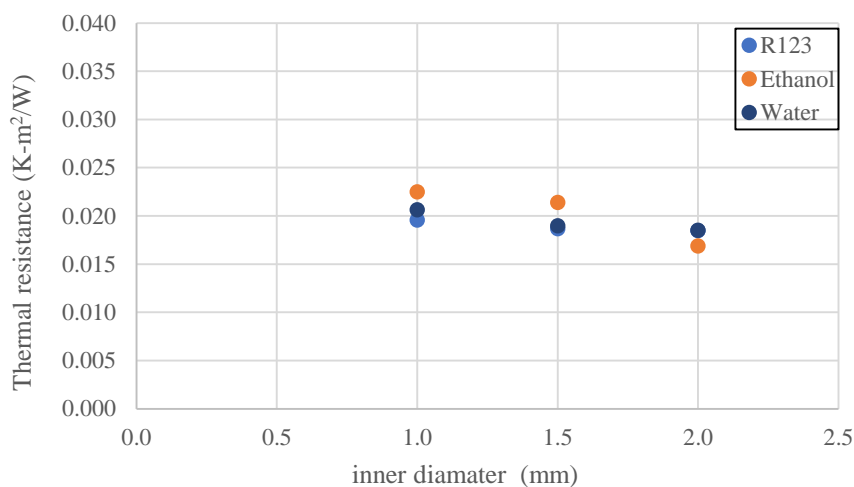
สำหรับการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนส่วนใหญ่จะทำการศึกษาโดยใช้ค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Thermal resistance หน่วย $K\cdot m^2/W$) เปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน สำหรับตัวแปรแรกที่ศึกษาคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ โดยท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองจะแปรเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ค่าได้แก่ 1.07, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในดังกล่าวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่เกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต (Critical inner diameter, $D_{i,crit}$) [8] เพื่อรักษารูปแบบการไหลของสารทำงานให้เป็น ฟองไอ (Vapor plug) และแท่งของเหลว (Liquid slug) ตลอดความยาวของท่อความร้อน จากการทดลองพบว่า ผลการทดลองทุกชุดการทดลองจะมีแนวโน้มเหมือนกันนั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนหน่วยพื้นที่มีค่าลดลง จากรูปที่ 61-63 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของชุดทดลอง 3 ชุด ได้แก่ ชุดการทดลอง ($L_e = 50$ mm, $T = 32$ turns) ชุดทดลอง ($L_e = 100$ mm, $T = 32$ turns) และชุดทดลอง ($L_e = 150$ mm, $T = 32$ turns)



รูปที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

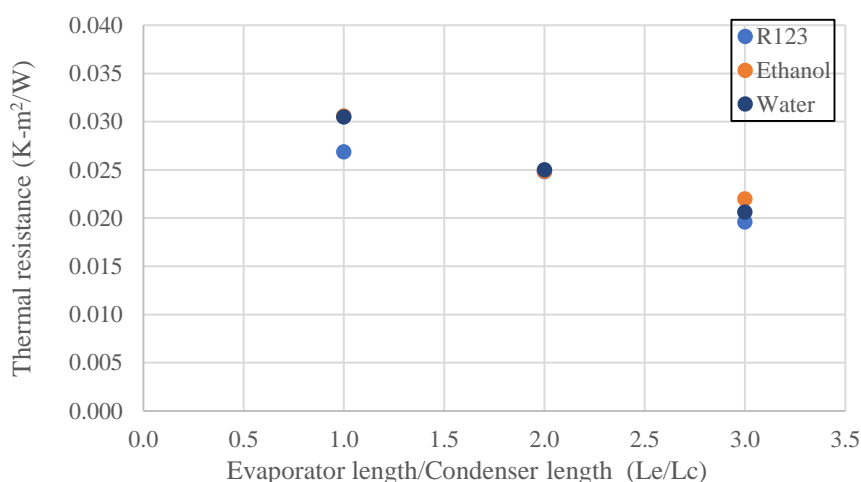


รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

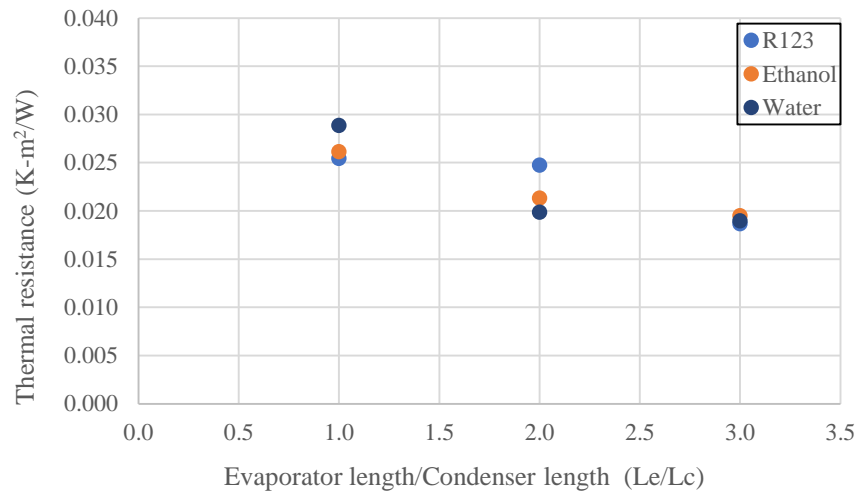
จากรูปที่ 61-63 พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าลดลงทุกๆสารทำงาน จากการพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของท่อความร้อนแบบส่นวงรอบจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน นอกจากจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้ความร้อนแก่สารทำงานแล้วยังเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดการไหลแก่สารทำงานอีกด้วย ทำให้สารทำงานสามารถไหลเวียนภายในท่อความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเกิดได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 61 จะสังเกตว่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานทั้ง 3 สารทำงานมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้นจาก 1 มม เป็น 1.5 และ 2.03 มม โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoensawan et al. [7] ที่ได้ทดลองท่อความร้อนแบบส่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 และ 2 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 5 ไปจนถึง 23 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ เอทานอล และ R-123 อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรของท่อที่เหลือทั้งหมด พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นหรือค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเป็นการเพิ่มขนาดช่องว่างการไหลของสารทำงานภายในท่อทำให้สารทำงานมีค่าแรงต้านการไหลลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในทำให้สารทำงานไหลจากส่วนควบแน่นไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนทำระเหยได้ง่ายขึ้น สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

4.1.2 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบ สิ้นวงจรชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

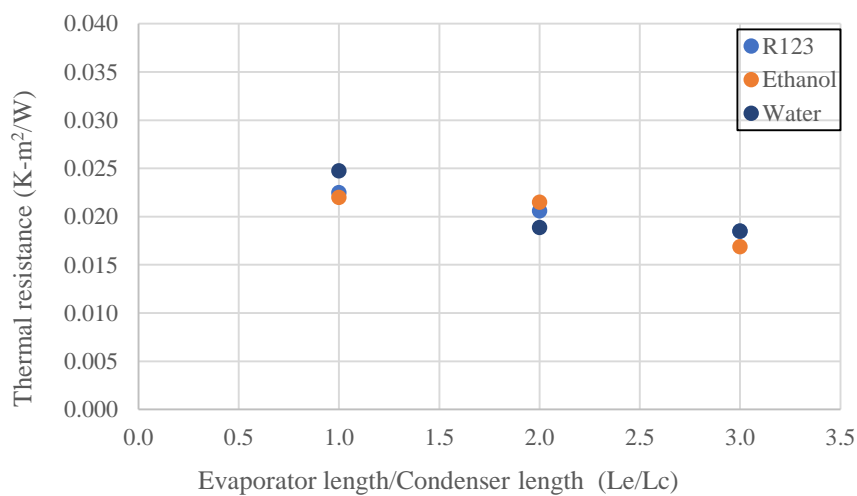
สำหรับความยาวส่วนทำระเหยเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับผ่านผนังท่อไปยังสารทำงานที่อยู่ภายในท่อ เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนก็จะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สของเหลวกลายเป็นฟองไอและเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อน งานวิจัยนี้ได้กำหนดความยาวส่วนควบแน่นคงที่คือ 100 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยคือ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแตกต่างกันไปจากงานวิจัยอื่นคือส่วนใหญ่จะกำหนดให้ความยาวส่วนทำระเหยและความยาวส่วนควบแน่นเท่ากันหรือกำหนดให้ความยาวส่วนควบแน่นยาวกว่าส่วนทำระเหยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ Dry out ดังนั้นในการแสดงผลการทดลองนี้จะแสดงในรูปแบบสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่น (L_e/L_c) โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่น (L_e/L_c) กับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ($K\text{-m}^2/W$) ของชุดทดลอง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 64-66



รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



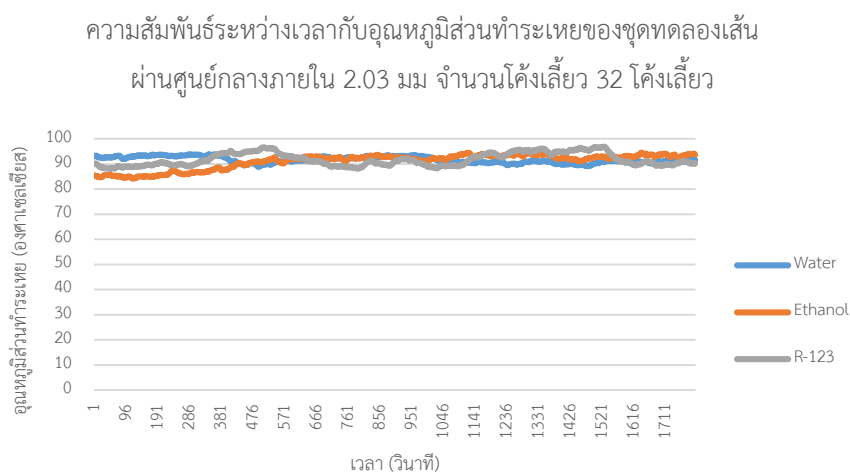
รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

จากรูปที่ 64-66 เมื่อสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าลดลง ทำให้สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่ในการรับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้แห้งของเหลวสามารถระเหยกลายเป็นไอและไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น แต่ถ้าความยาวส่วนทำระเหยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นมีค่าสูงขึ้น อาจจะทำให้เกิดการแห้ง (Dry out) ได้ง่ายขึ้น จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา

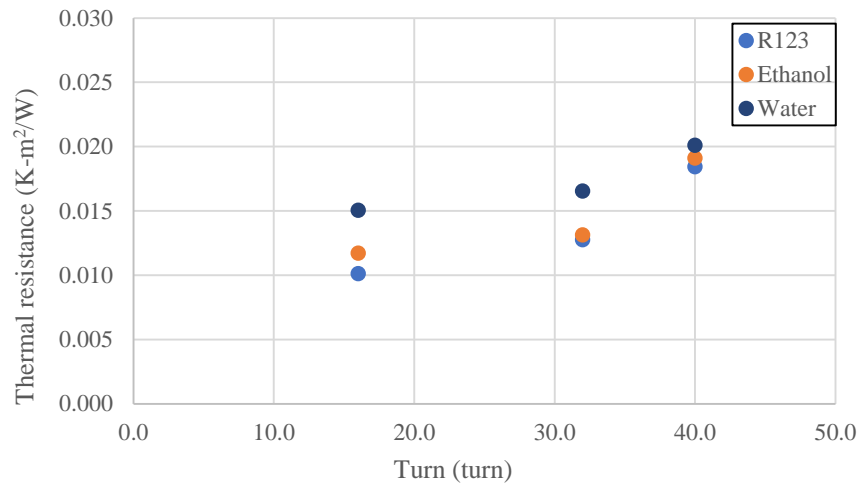
อุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 67 พบว่า อุณหภูมิส่วนทำระเหยไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเนื่องจากงานวิจัยนี้มีการควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหย ดังนั้นเมื่อสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น จะไม่เกิดปรากฏการณ์การแห้ง (Dry out) ทำให้สารทำงานภายในท่อเกิดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น



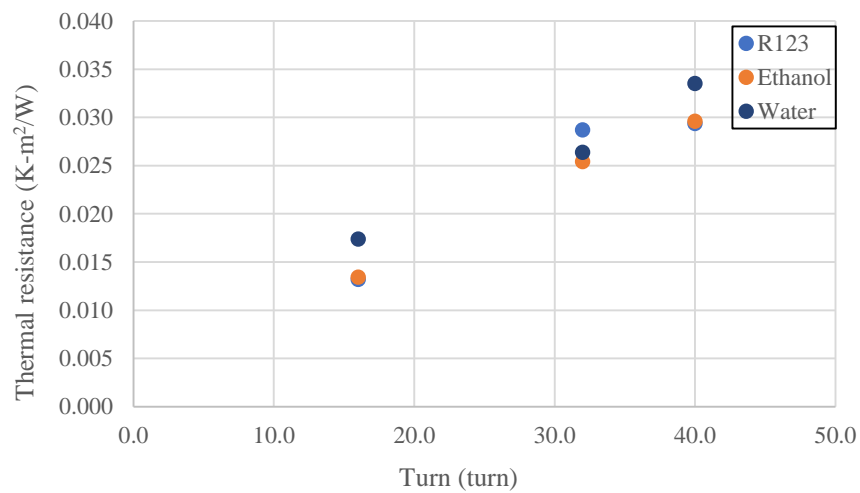
รูปที่ 67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน

4.1.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสันวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

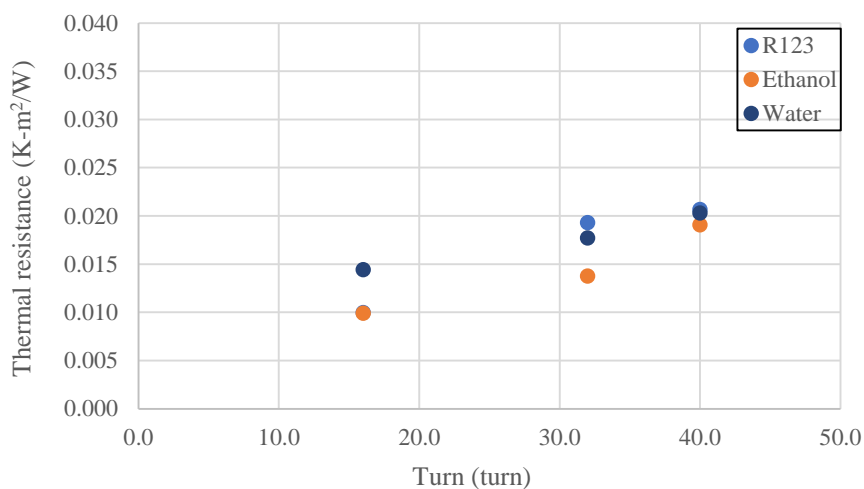
จำนวนโค้งเลี้ยว คือ จำนวนของการดัดท่อโค้งทั้งหมดอาจจะอยู่ในส่วนทำระเหยหรืออยู่ในส่วนควบแน่นก็ได้ โค้งเลี้ยวถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของท่อความร้อนแบบสันทุกชนิด เนื่องจากเป็นส่วนเชื่อมระหว่างท่อที่วางตัวขนานกัน ทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ต่อเนื่อง จึงทำให้จำนวนโค้งเลี้ยวส่งผลต่อสมรรถนะทางความร้อนโดยตรง สำหรับการศึกษาจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนในงานวิจัยนี้จะทำการแปรค่าจำนวนโค้งเลี้ยว 3 โค้งเลี้ยวคือ 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ของชุดทดลอง ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม และความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 68-70



รูปที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม

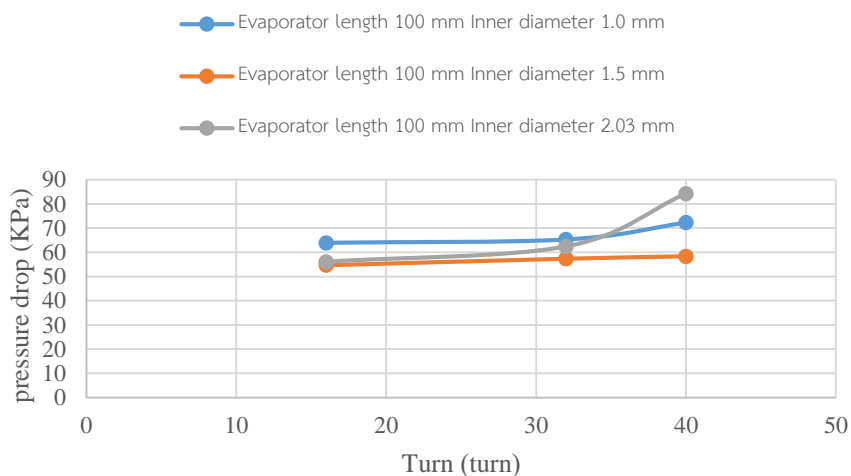


รูปที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม



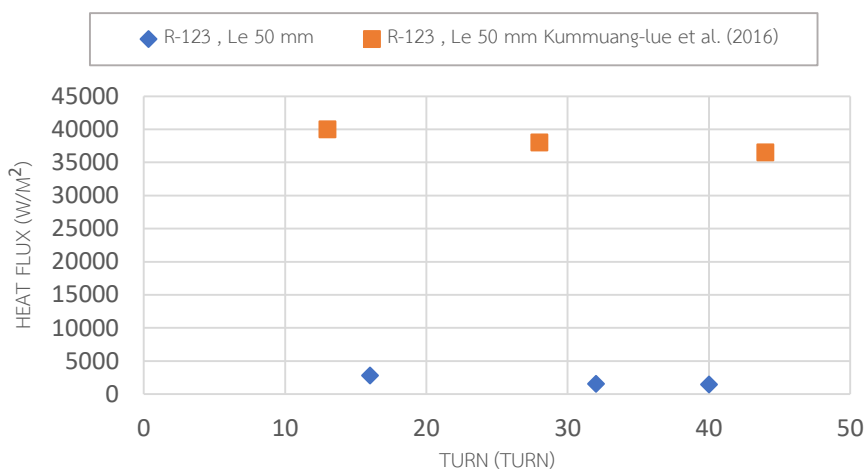
รูปที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม

จากรูปที่ 68-70 พบว่า เมื่อจำนวนโค้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้สัณฐานทางความร้อนของท่อความร้อนลดลง เนื่องจาก การเพิ่มจำนวนจำนวนโค้งเฉลี่ย ความยาวรวมของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียตกคร่อมบริเวณท่ออ (Minor loss) และความดันสูญเสียตกคร่อมบริเวณท่อส่วนที่เป็นท่อตรง (Major loss) เพิ่มขึ้น ความสูญเสียทั้งสองจะส่งผลต่อการไหลของสารทำงานภายในท่อเนื่องจากการเพิ่มความเสียดทานต่อการไหลของสารทำงาน จึงทำให้สารทำงานมีความเร็วในการไหลเพื่อถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นลดลง อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าลดลง จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของไหลพบว่า ความดันตกคร่อมมีผลต่อการไหลของสารทำงานภายในท่อเนื่องจากความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้นและจำนวนโค้งเฉลี่ยที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้สารทำงานไหลจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้ไม่ดี จากการศึกษาผลของความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเฉลี่ยพบว่า เมื่อจำนวนโค้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันตกคร่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 71



รูปที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเลี้ยวสำหรับการวางแนวตั้ง

จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ kammuang-lue และคณะ [20] ได้ทำการทดลองท่อความร้อนแบบสลับวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 5 7 10 16 และ 30 โค้งเลี้ยว ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 และ 150 มิลลิเมตร ใช้สารทำงานคือ R-123 และน้ำ อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรทั้งหมด พบว่า เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 13 โค้งเลี้ยวไปยัง 44 โค้งเลี้ยว ค่าความหนาแน่นความร้อนจะมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวรวมของท่อเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงเสียดทาน (Frictional force) ของการไหลเวียนระหว่างสารทำงานกับผนังท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Niti kammuang-lue และคณะ [20] สำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร สารทำงาน คือ R-123 จำนวนโค้งเลี้ยว 16 32 และ 40 โค้งเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 72



รูปที่ 72 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่ต่อสมรรถนะทางความร้อนดับ
ผลงานวิจัยของ Kammuang-lue และคณะ [20] วางชุดทดลองในแนวตั้ง

จากรูปที่ 72 พบว่า จำนวนโค้งเลี้ยวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นความร้อนมีค่าลดลงหรือความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก จำนวนโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้นทำให้ความยาวรวมของท่อมีค่าเพิ่มขึ้น การไหลของสารทำงานภายในท่อเกิดความดันสูญเสียหลักและความดันสูญเสียรองและเกิดแรงต้านทานการไหลระหว่างสารทำงานกับผิวท่อ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นมีค่าลดลง สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าลดลง

4.1.4 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ ชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

สารทำงาน คือ ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ถูกบรรจุอยู่ในท่อที่มีสถานะการทำงานอยู่ 2 สถานะได้แก่ สถานะแห้งของเหลวและสถานะฟองไอ โดยเริ่มจากสถานะแห้งของเหลวจะได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกบริเวณส่วนทำระเหยและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสถานะฟองไอไหลไปยังส่วนกันความร้อน จากส่วนกันความร้อนสารทำงานจะไหลไปยังส่วนควบแน่นเพื่อระบายความร้อนไปสู่ภายนอกผ่านผิวท่อ หลังจากนั้นสารทำงานจะควบแน่นกลับไปเป็นแห้งของเหลวไหลวนกลับไปยังส่วนทำระเหยเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง การเคลื่อนที่ของสารทำงานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงาน เช่น ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น แรงตึงผิว เป็นต้น จากการศึกษาได้กำหนดชนิดของสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่แตกต่างกันคือ 161,

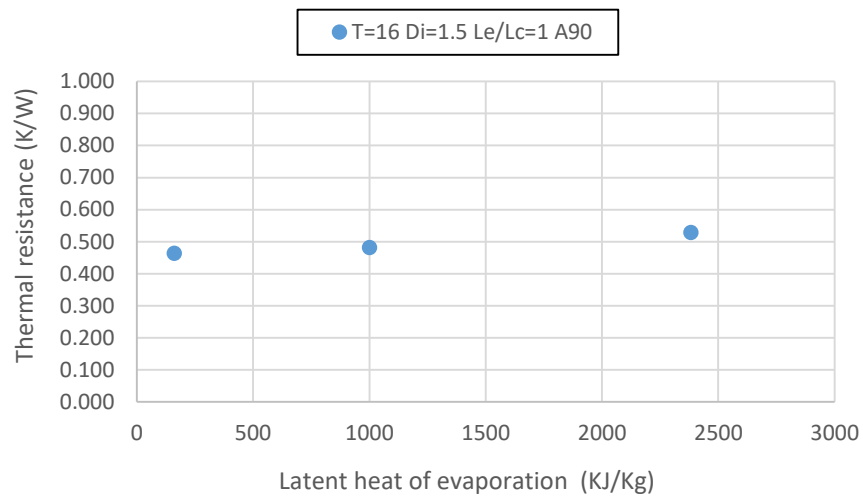
1,000 และ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการเพิ่มสารทำงาน คือ 50% โดยปริมาตรของท่อที่เหลือทั้งหมด ท่อความร้อนนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.07, 1.50 และ 2.03 มิลลิเมตร มีความยาวส่วนระเหยเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยวเท่ากับ 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหยอยู่ที่ 40-100 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าความร้อนแฝงเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านความร้อนต่อมีแนวโน้ม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงแนวโน้มน้ำค่าความต้านทานความร้อนเมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น

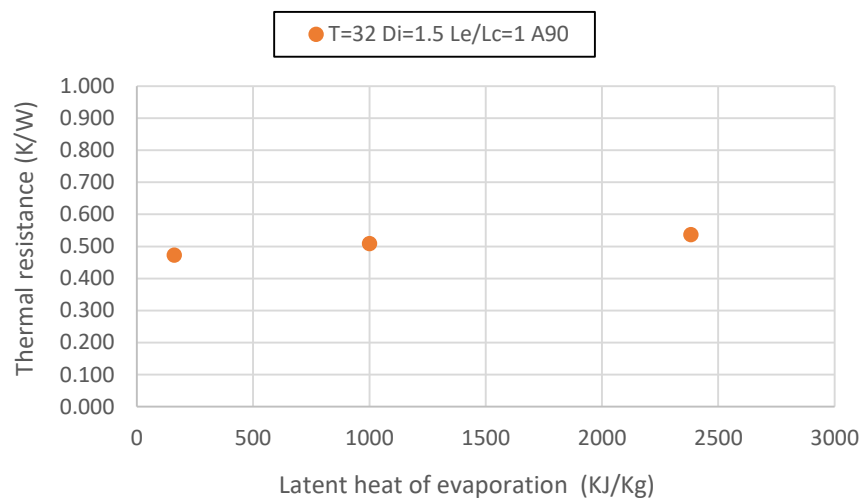
การเปลี่ยนแปลง สัดส่วน L_e/L_c	แนวโน้มน้ำของค่าความต้านทานความร้อน (ทุกชุดการทดลอง)					รวม
	เพิ่มขึ้น	ลดลง	เพิ่มขึ้น-ลดลง	ลดลง-เพิ่มขึ้น	ไม่มีนัยสำคัญ	
1	9	7	3	8	0	27
2	14	2	5	6	0	27
3	12	4	4	7	0	27
รวม	35	13	12	21	0	81
คิดเป็น	43%	16%	15%	26%	0	100%

จากผลการวิเคราะห์แนวโน้มน้ำทั้งหมดทางสถิติพบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น โดยคิดเป็น 43% ของชุดทดลองทั้งหมดของมุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง ดังนั้นแนวโน้มน้ำนี้จะถูกใช้เป็นตัวแทนของแนวโน้มน้ำทั้งหมด

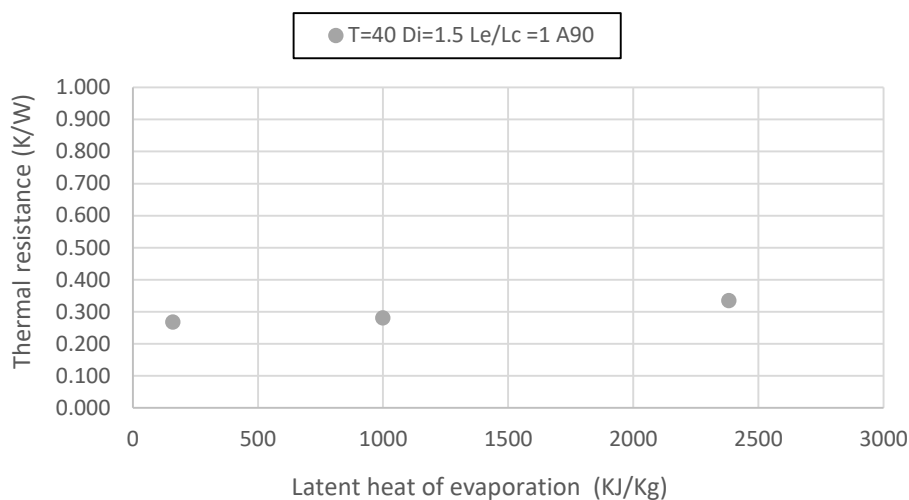
รูปที่ 73-75 แสดงตัวอย่างชุดทดลองที่ความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 1 ($T=16 D_i=1.5 L_e/L_c=1$) ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 1 ($T=32 D_i=1.5 L_e/L_c=1$) และชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 1 ($T=40 D_i=1.5 L_e/L_c=1$) มุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง พบว่า เมื่อความร้อนแฝงของสารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 161 เป็น 1,000 และ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นคือ 0.46, 0.48 และ 0.52 K/W ตามลำดับ สำหรับชุดทดลอง $T=16 D_i=1.5 L_e/L_c=1$ เพิ่มขึ้นจาก 0.47, 0.51 และ 0.54 K/W ตามลำดับ สำหรับชุดทดลอง $T=32 D_i=1.5 L_e/L_c=1$ และเพิ่มขึ้นจาก 0.26, 0.28 และ 0.34 K/W ตามลำดับ สำหรับชุดทดลอง $T=40 D_i=1.5 L_e/L_c=1$



รูปที่ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=16 Di=1.5 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวดิ่ง



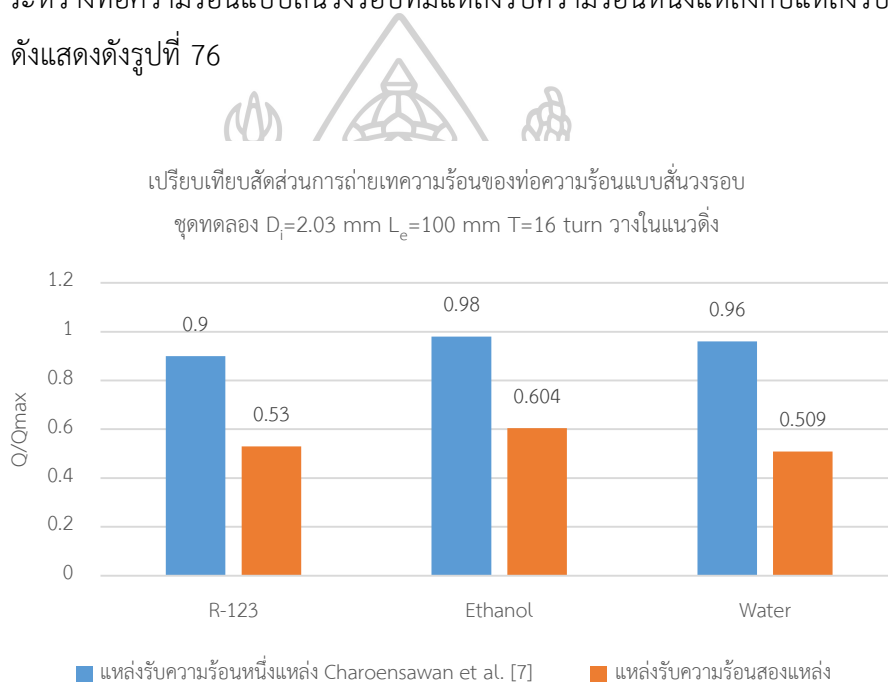
รูปที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.5 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวดิ่ง



รูปที่ 75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง $T=40$ $D_i=1.5$ $L_e/L_c=1$ มุมเอียงการทำงานในแนวดิ่ง

จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kammuang-lue et.al [4] ได้ทดลองท่อความร้อนแบบสั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ R-123 เอทานอล และน้ำ อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรท่อที่เหลือทั้งหมด ใช้แผ่นเพลทเป็นแหล่งให้ความร้อนและแบ่งแหล่งให้ความร้อนออกเป็น 6 ชุด พบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารทำงาน R-123 มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอต่ำเมื่อได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหยจะทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะจากแห้งของเหลวกลายเป็นฟองไอได้ง่ายและสามารถไหลจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้ดีขึ้น ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ส่งผลให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นมีค่าต่างกันน้อย จึงทำให้ค่าความต้านทานความร้อนมีค่าลดลง ในกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำมีค่ามากกว่า R-123 และ เอทานอล ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนน้ำจะใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะนานกว่า R-123 และ เอทานอล ก่อนไหลไปยังส่วนควบแน่นทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น สมรรถนะทางความร้อนจึงมีค่าลดลง

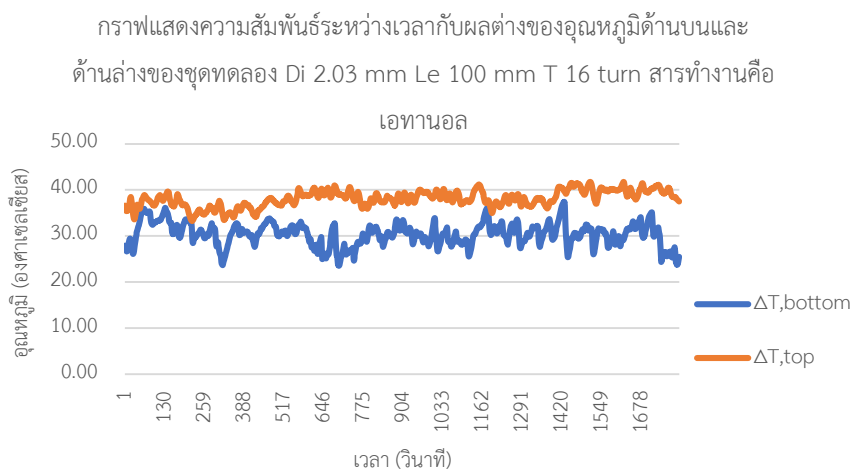
จากการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งโดยวางชุดทดลองในแนวตั้งเป็นการออกแบบชุดทดลองที่ประยุกต์มาจากการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบระหว่างแหล่งรับความร้อนสองแหล่งกับแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ทำการทดลองที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร สารทำงานคือ R-123 เอทานอล และน้ำ โดยการเปรียบเทียบผลของสัดส่วนการถ่ายเทความร้อน (Q/Q_{max}) ระหว่างท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งกับแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง ดังแสดงดังรูปที่ 76



รูปที่ 76 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งกับสองแหล่ง

จากรูปที่ 76 พบว่า ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งมีค่าสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง เนื่องจากท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งมีลักษณะทำงานแบบโหมดความร้อนด้านล่าง (Bottom heat mode : BTM) ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น นอกจากนี้สสารที่ใช้เป็นตัวนำความร้อนออกจากชุดทดลองบริเวณส่วนควบแน่นมีความแตกต่างกัน โดยงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ใช้น้ำเอทิลีนไกลคอล ส่วนงานวิจัยนี้ใช้อากาศ ทำให้ปริมาณความร้อนเมื่อใช้น้ำเอทิลีนไกลคอลระบายความร้อนบริเวณ

ส่วนควบแน่นมีปริมาณมากกว่าใช้อากาศในการระบายความร้อน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยพิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง แสดงดังรูปที่ 77



รูปที่ 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง Di 2.03 mm Le 100 mm T 16 turn สารทำงานคือ เอทานอล

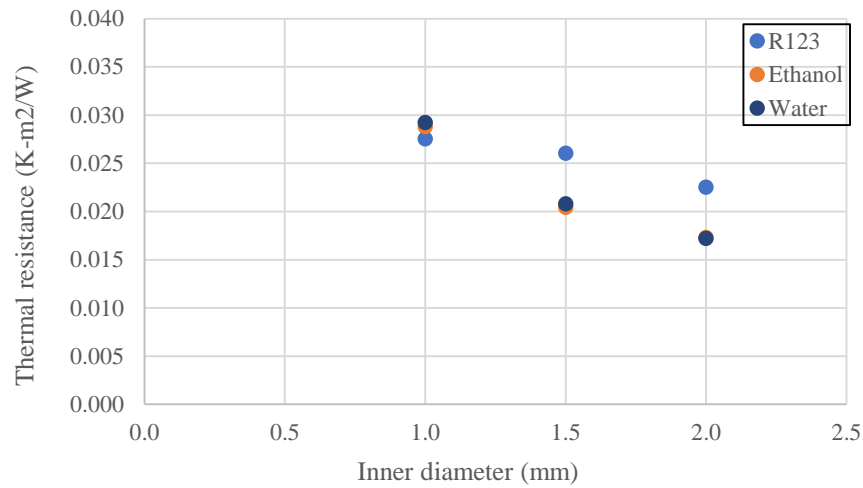
จากรูปที่ 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ R-123 เอทานอล และน้ำ พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนมีค่าค่อนข้างสูงกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านล่าง เนื่องจากการวางชุดทดลองในแนวตั้งของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง แหล่งให้ความร้อนจะมีลักษณะการให้ความร้อนด้านบน (Top heat mode : THM) และการให้ความร้อนด้านล่าง (Bottom heat mode : BHM) เมื่อพิจารณาการให้ความร้อนด้านล่าง (BHM) ลักษณะการไหลของสารทำงานจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น แต่เนื่องจากชุดทดลองนี้มีการให้ความร้อนด้านบน (THM) ทำให้สารทำงานที่ได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหยด้านบนไหลลงมาถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นหลังจากนั้นต้องเอาชนะแรงโน้มถ่วงเพื่อกลับไปรับความร้อนบริเวณส่วนทำระเหยอีกครั้ง [17] ทำให้ลักษณะการไหลของสารทำงานจะไหลต้านแรงโน้มถ่วง [21] และผลต่างระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นด้านบนจะมีค่าเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่ง

รับความร้อนสองแหล่งจึงมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบ สิ้นวงรอบที่แหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งมีค่าสูงกว่าแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

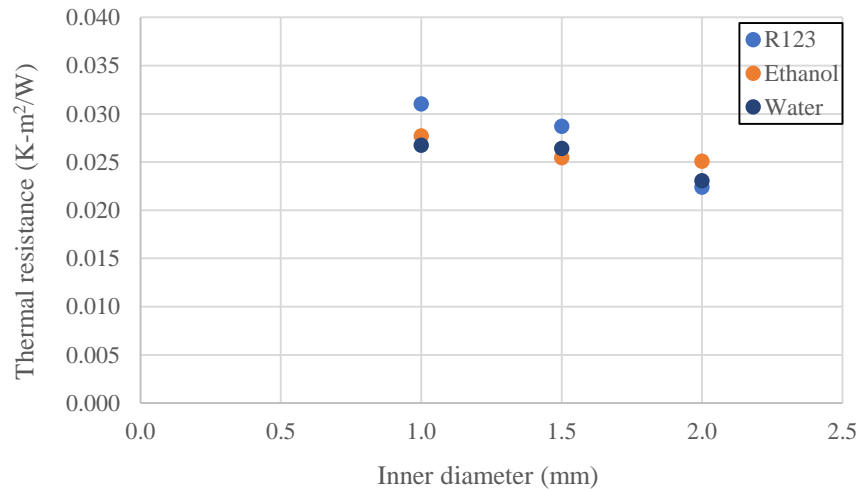
4.2 สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่ วางตัวในแนวนอน

การศึกษาเทคโนโลยีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบที่วางตัว ในแนวนอนหรือใกล้เคียงแนวนอนมีแนวโน้มเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน การออกแบบอุปกรณ์ทาง ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ มีความหลากหลายมากขึ้น การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบที่วางตัวในแนวนอนจึงมีความสำคัญเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการ ระบายความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่เกิดความร้อนในขณะทำงานเมื่อวางตัวในแนวนอน การศึกษานี้จะมีการวางแนวท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบในแนวนอนและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นโดยศึกษาผลของ เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว ชนิดของสารทำงาน ที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน ของท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบที่มีแหล่งให้ความร้อนสองแหล่ง อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ถือว่าเป็น งานวิจัยใหม่ที่ยังไม่มีการศึกษาซึ่งผลการทดลองของตัวแปรต่างๆที่ได้อาจเป็นไปตามการอ้างอิงจาก งานวิจัยอื่น แต่บางครั้งผลการทดลองก็อาจจะเป็นผลการทดลองที่ไม่มีการอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ซึ่ง ผลการทดลองที่ได้นี้อาจเป็นข้อมูลที่เอาไว้เพื่อการศึกษาต่อไป โดยผลการทดลองของตัวแปรต่างๆมี ดังนี้

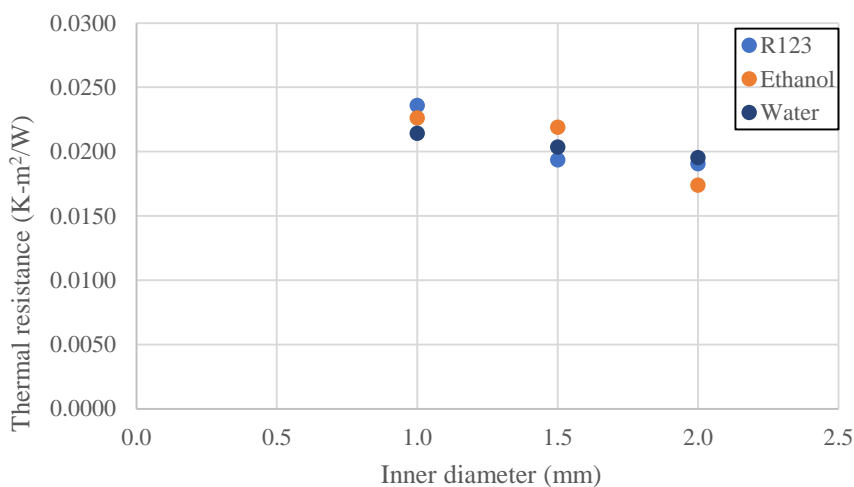
4.2.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบ
 สี่นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง



รูปที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อ
 หน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อ
 หน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



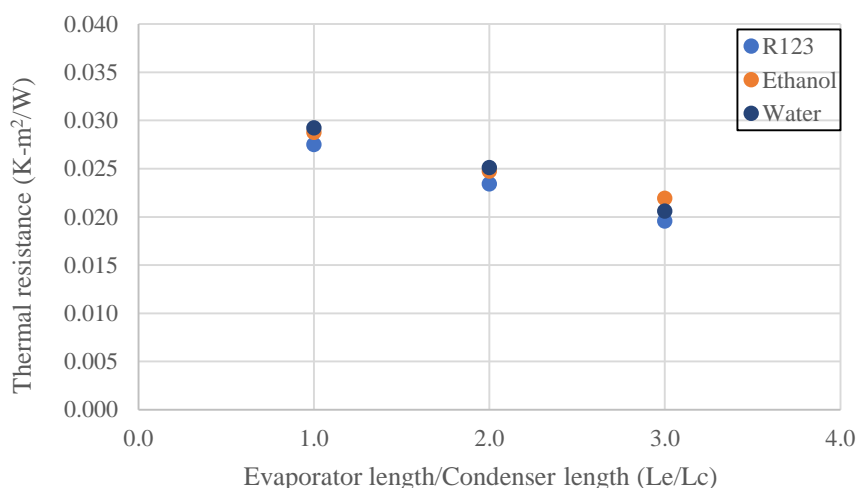
รูปที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

จากรูปที่ 78-80 แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ลดลง ทำให้สมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่เพิ่มขึ้นทำให้สารทำงานมีความดันตกคร่อมในการไหลลดลง สารทำงานสามารถไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นเพื่อไปถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ในรับความร้อนและพื้นที่ระบายความร้อนจะเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานความร้อนมีค่าลดลง โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoensawan และ Terdtoon [5] ได้ทำการทดลองท่อความร้อนแบบสั่นวรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 5, 11, 16 และ 26 โค้งเลี้ยว อัตราส่วนการเติมคือ 30%, 50% และ 80% โดยปริมาตรท่อทั้งหมด ใช้สารทำงานคือ น้ำ เอทานอลบริสุทธิ์ ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหยอยู่ที่ 40-90 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นทีละ 10 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าลดลง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดความดันตกคร่อมและเกิดแรงต้านทานการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoensawan P et al. [7] ที่ได้ทดสอบท่อความร้อนแบบสั่นวรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 และ 2 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 5 ไปจนถึง 23 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ เอทานอล และ R-123 อัตราส่วนการเติม 50% โดยปริมาตรของท่อที่เหลือทั้งหมด พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเป็นการเพิ่มขนาดช่องว่างการไหลภายใน

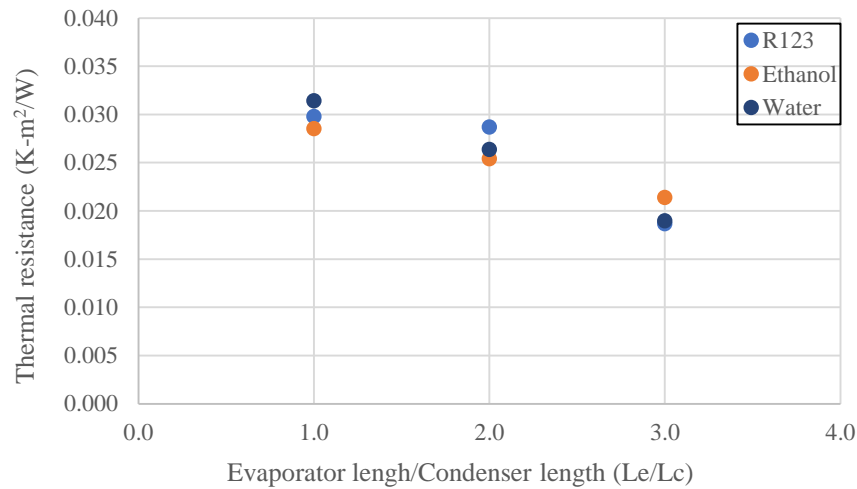
ท่อทำให้แรงต้านการไหลของสารทำงานลดลง ส่งผลให้สารทำงานไหลไปแลกเปลี่ยนความร้อนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.2 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

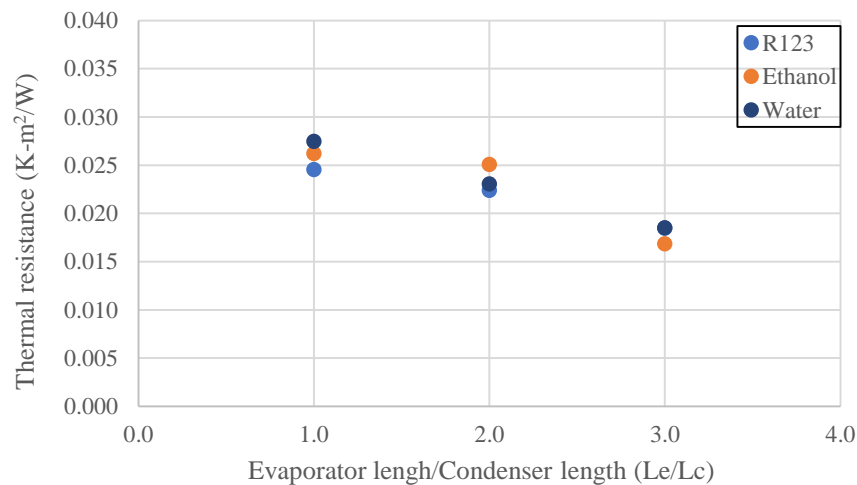
สำหรับความยาวส่วนทำระเหยเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับผ่านผนังท่อไปยังสารทำงานที่อยู่ภายในท่อ เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนก็จะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สของเหลวกลายเป็นฟองไอและเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อน งานวิจัยนี้ได้กำหนดความยาวส่วนควบแน่นคงที่คือ 50 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยคือ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร โดยจะแตกต่างกันไปจากงานวิจัยอื่นที่ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ความยาวส่วนทำระเหยและความยาวส่วนควบแน่นเท่ากันหรือกำหนดให้ความยาวส่วนควบแน่นยาวกว่าส่วนทำระเหยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ Dry out ดังนั้นในการแสดงผลการทดลองนี้จะแสดงในรูปแบบสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่น (L_e/L_c) โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่น (L_e/L_c) กับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ($K\cdot m^2/W$) แสดงดังรูปที่ 81-83



รูปที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



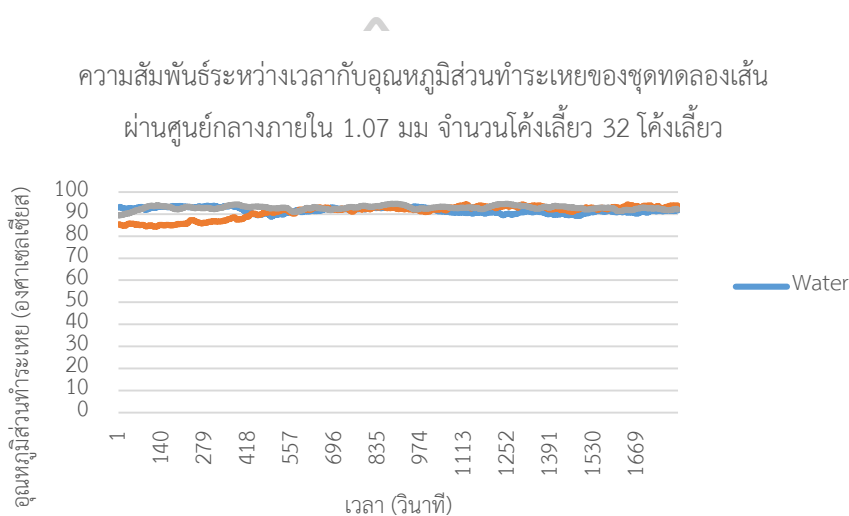
รูปที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

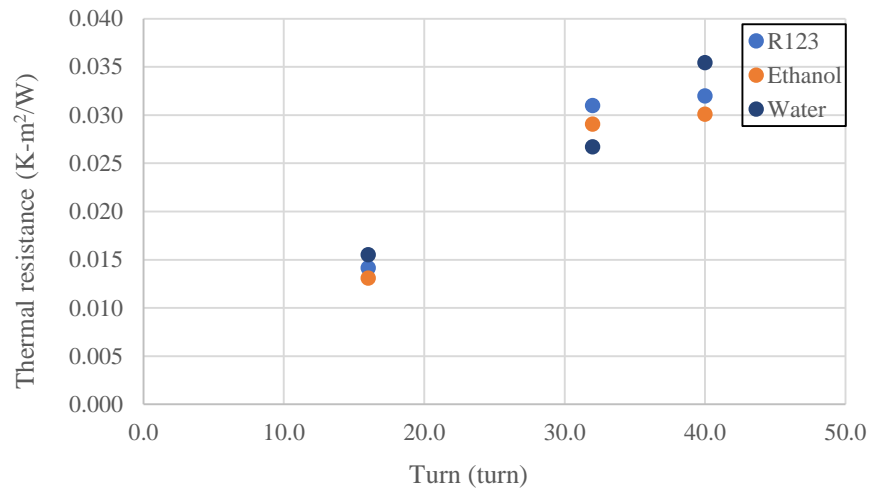
จากรูปที่ 81-83 ผลการทดลองพบว่า เมื่อสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าลดลง เนื่องจากความยาวส่วนทำระเหยที่เพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่ในการรับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้แท่งของเหลวสามารถระเหยกลายเป็นฟองไอและไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น แต่ถ้าความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มสูงขึ้น หรือ

สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นสูงขึ้นอาจทำให้เกิดแห้ง (Dry out) ได้ง่ายขึ้น จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.07 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 84 พบว่า ทั้ง 3 สารทำงานอุณหภูมิส่วนทำระเหยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ดังนั้นเมื่อสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์การแห้ง (Dry out) จะไม่เกิดขึ้น ทำให้สารทำงานภายในท่อเกิดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

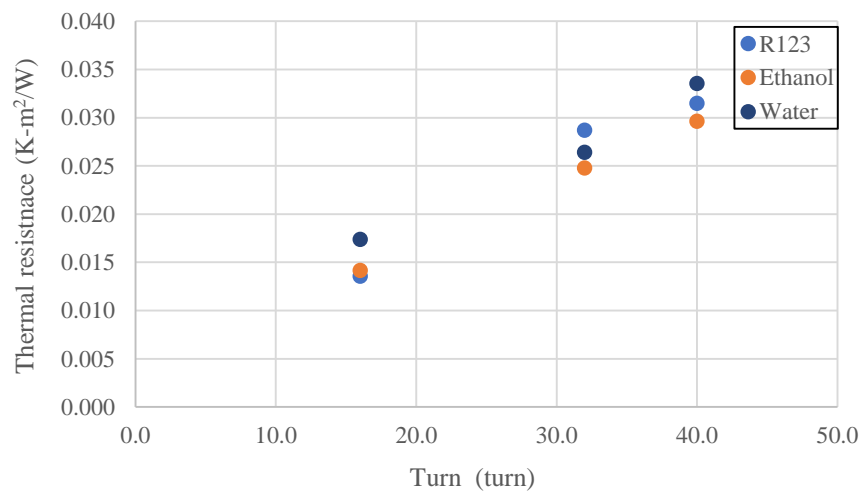


รูปที่ 84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.07 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว ของทั้ง 3 สารทำงาน

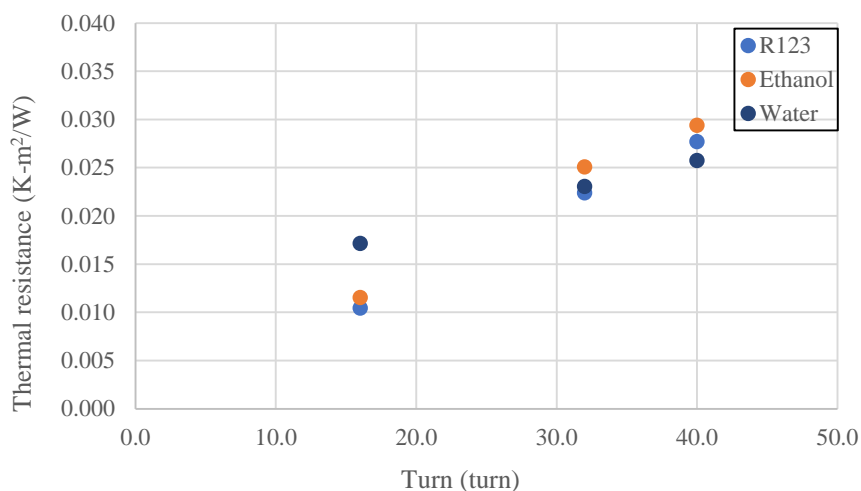
4.2.3 ผลของจำนวนโค้งเกลียวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น
วงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง



รูปที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเกลียวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มม

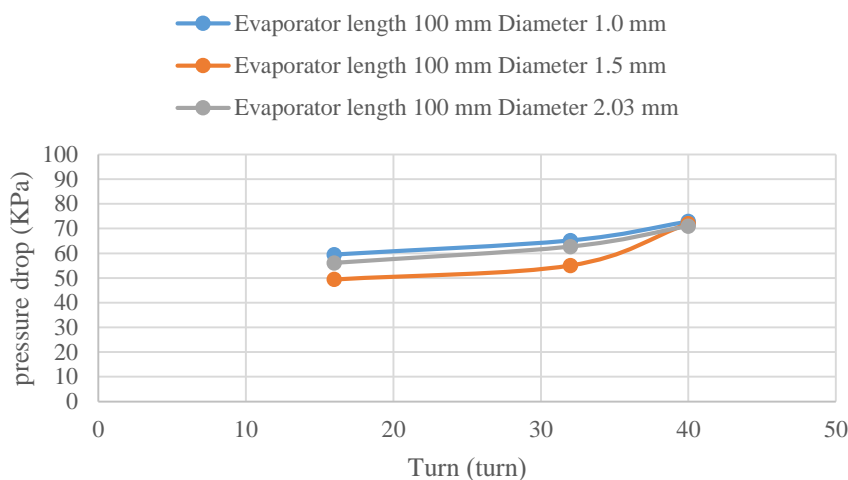


รูปที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเกลียวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม



รูปที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม

จากรูปที่ 85-87 เมื่อจำนวนโค้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้สมรรถนะทางความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มจำนวนโค้งเฉลี่ยถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแบบสั่นทุกชนิด เนื่องจากเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มท่อตรงที่วางตัวขนานกัน ทำให้สารทำงานสามารถไหลเวียนได้อย่างต่อเนื่อง ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.3 เมื่อจำนวนโค้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความดันสูญเสียตกคร่อมบริเวณท่ออ หรือที่เรียกว่า ความสูญเสียรอง (minor loss) เพิ่มขึ้นและความดันสูญเสียตกคร่อมบริเวณท่อตรง หรือเรียกว่า ความสูญเสียหลัก (major loss) [22] ความสูญเสียทั้งสองจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อการไหลเวียนของสารทำงานเพิ่มขึ้น ความเร็วการไหลของสารทำงานที่จะไปแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง ทำให้ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของไหลระหว่างค่าความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเฉลี่ยพบว่า เมื่อจำนวนโค้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันตกคร่อมของสารทำงานที่ไหลภายในท่อมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวท่อและจำนวนโค้งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการไหลของสารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 88



รูปที่ 88 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับจำนวนโค้งเล็กสำหรับการวางแนวนอน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนโค้งเล็กของชุดทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความดันสูญเสียหลักและความดันสูญเสียรองทำให้เกิดความดันตกคร่อมเนื่องจากการไหลของสารทำงาน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นลดลง สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าลดลง

4.2.4 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

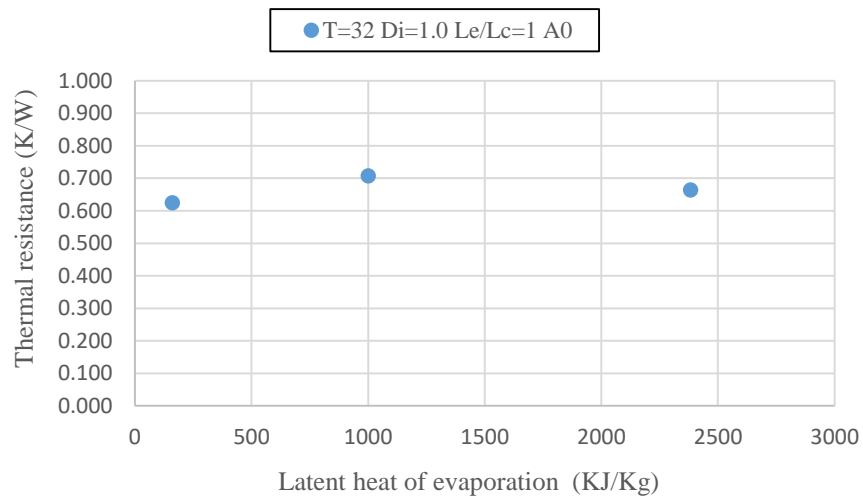
การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่วางในแนวนอนมีหลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยกลไกการระเหยและการควบแน่นของสารทำงานเหมือนกับการวางในแนวตั้งซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.4 ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่แหล่งความร้อนสองแหล่งในแนวนอนคือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ จากการศึกษาได้กำหนดชนิดของสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่แตกต่างกันคือ 161, 1,000 และ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน คือ 50% โดยปริมาตรของท่อที่เหลือทั้งหมด ท่อความร้อนนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.07, 1.50 และ 2.03 มิลลิเมตร มีความยาวส่วนระเหยเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเล็กเท่ากับ 16, 32 และ 40 โค้งเล็ก ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหยอยู่ที่ 40-100 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าความร้อนแฝงเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานความร้อนต่อมีแนวโน้ม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานความร้อนเมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น

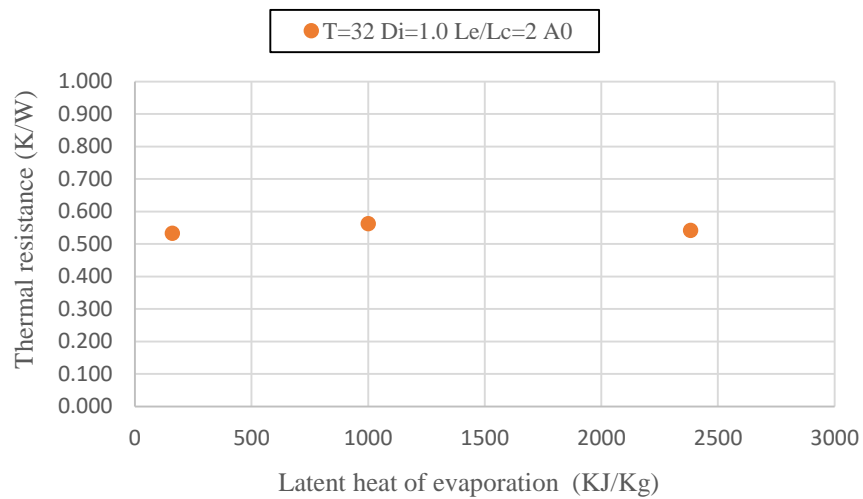
การเปลี่ยนแปลง สัดส่วน L_e/L_c	แนวโน้มของค่าความต้านทานความร้อน (ทุกชุดการทดลอง)					รวม
	เพิ่มขึ้น	ลดลง	เพิ่มขึ้น-ลดลง	ลดลง-เพิ่มขึ้น	ไม่มีนัยสำคัญ	
1	7	3	8	9	0	27
2	8	1	10	8	0	27
3	6	2	11	8	0	27
รวม	21	6	29	25	0	81
คิดเป็น	26%	7%	36%	31%	0	100%

จากผลการวิเคราะห์แนวโน้มทั้งหมดทางสถิติพบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีแนวโน้มแบบเพิ่มขึ้น-ลดลง โดยคิดเป็น 36% ของชุดทดลองทั้งหมดที่ทดลองในแนวนอน ดังนั้นแนวโน้มนี้จะถูกใช้เป็นตัวแทนของแนวโน้มทั้งหมด

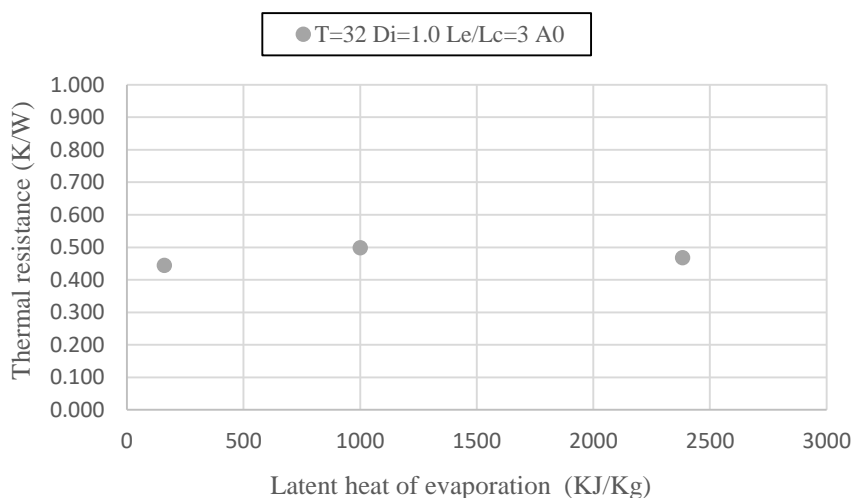
รูปที่ 89-91 แสดงตัวอย่างชุดทดลองที่ความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มแบบเพิ่มขึ้น-ลดลง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 1 ($T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=1$) ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 2 ($T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=2$) และชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 3 ($T=40$ $D_i=1.5$ $L_e/L_c=3$) มุมเอียงการทำงานในแนวนอน พบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของสารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 161 เป็น 1,000 และ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง $T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=1$ จะเพิ่มขึ้นจาก 0.62 เป็น 0.71 และลดลงเหลือ 0.66 K/W ตามลำดับ ชุดทดลอง $T=32$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=2$ จะเพิ่มขึ้นจาก 0.53 เป็น 0.56 และลดลงเหลือ 0.54 K/W ตามลำดับ และชุดทดลอง $T=40$ $D_i=1.0$ $L_e/L_c=3$ จะเพิ่มขึ้นจาก 0.44 เป็น 0.50 และลดลงเหลือ 0.47 K/W ตามลำดับ



รูปที่ 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=1 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน



รูปที่ 90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=2 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน

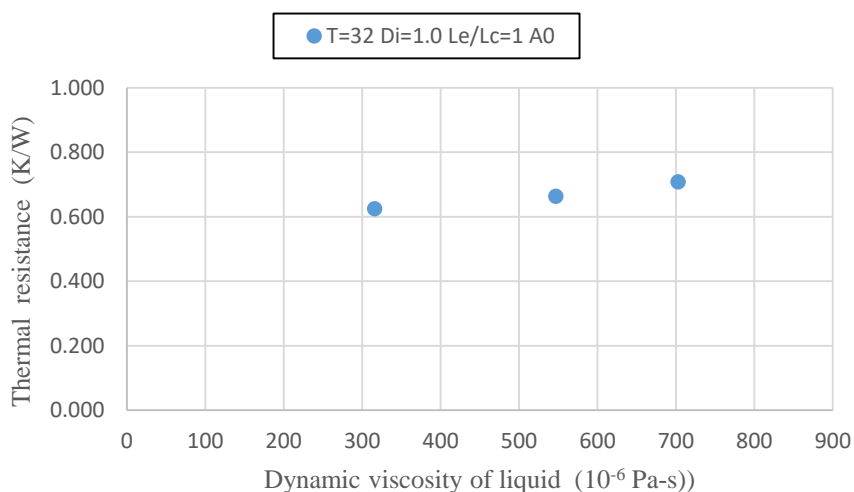


รูปที่ 91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=3 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน

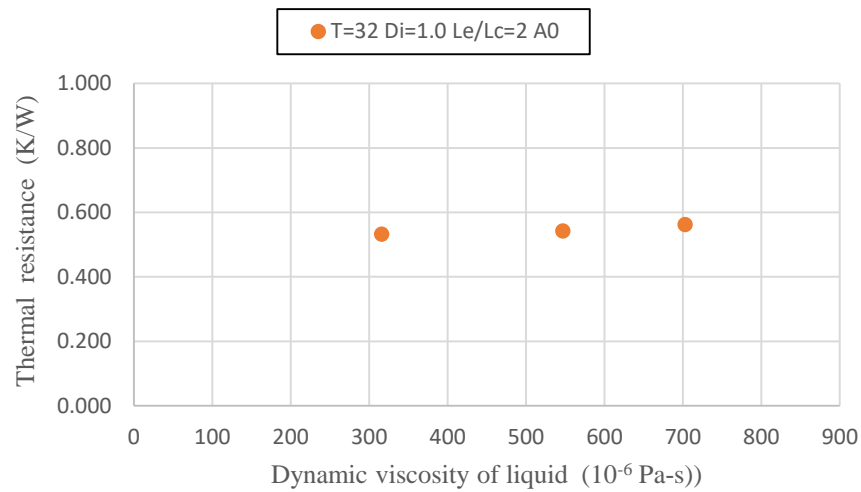
จากรูปที่ 89-91 พบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กันเหมือนกับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีมุมเอียงการทำงานในแนวตั้ง โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ คำเมืองลี [22] ที่ได้ทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ค่า ได้แก่ 1.06, 1.50 และ 2.03 มิลลิเมตร สารทำงานที่ใช้คือ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น ความหนาแน่นความร้อนป้อนให้ในแต่ละแหล่งความร้อนที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 1, 3 และ 5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร มุมเอียงการทำงานคือ 0 องศา พบว่า เมื่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากรูปแบบการไหลที่มีลักษณะสลับแบบกลับไปมาและมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลอย่างรวดเร็ว ทำให้สารทำงานที่อยู่ในส่วนทำระเหยที่รับความร้อนแต่ไม่เพียงพอสอดต่อการกลายเป็นไอ ถูกทำให้ไหลไปยังส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนทันที ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจะอาศัยทั้งความร้อนแฝงและความร้อนที่สัมผัสกันร่วมกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอวิเคราะห์ผลของสารทำงานที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งได้

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการไหลของสารทำงานภายในท่อพบว่า เป็นการไหลแบบสองสถานะ นั่นคือมีของเหลวที่เป็นฟองไอกับแท่งของเหลว ซึ่งคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์เกี่ยวข้องกับการไหลของสารทำงานแบบมีสองสถานะ (Two-phase flow) ที่สัมผัสกัน คือ ความหนืดจลน์ของของเหลว (Dynamic viscosity of liquid, μ_l) [23] เพราะว่า ความหนืดเป็นคุณสมบัติของของไหลที่บอกถึงความต้านทานการเคลื่อนที่ในของไหลนั้นๆซึ่งสภาวะการต้านทานมา

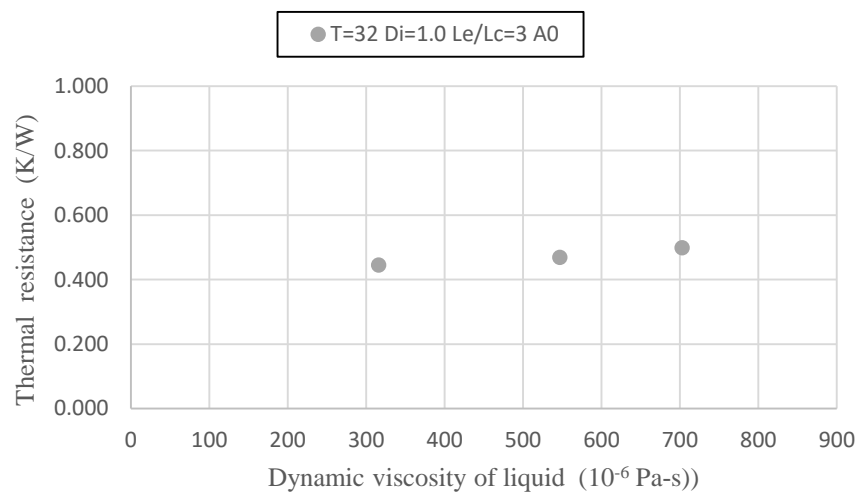
จากการเคลื่อนที่ของของไหลที่สัมพันธ์ระหว่างสถานะของเหลวและสถานะฟองไอ จากการศึกษาสารทำงานทั้ง 3 ชนิดคือ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น มีค่าความหนืดจลน์ของของเหลวที่แตกต่างกัน คือ 316, 703 และ 547 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ตามลำดับ รูปที่ 92-94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อน ของตัวอย่างชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 1 ($T=32$ $D_i=1.0$ $Le/L_c=1$) ชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 2 ($T=32$ $D_i=1.0$ $Le/L_c=2$) และชุดทดลองจำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 มิลลิเมตร สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อส่วนควบแน่น 3 ($T=32$ $D_i=1.0$ $Le/L_c=3$) มุมเอียงการทำงานในแนวนอน



รูปที่ 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง $T=32$ $D_i=1.0$ $Le/L_c=1$ มุมเอียงการทำงานในแนวนอน



รูปที่ 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=2 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน



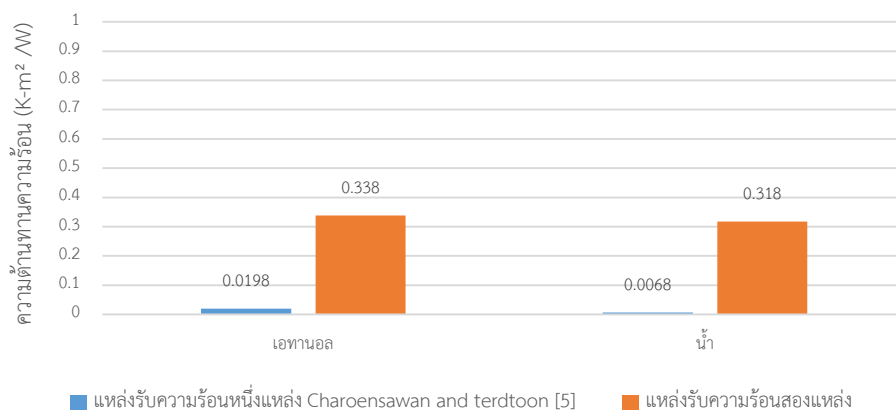
รูปที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์ของของเหลวกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง T=32 Di=1.0 Le/Lc=2 มุมเอียงการทำงานในแนวนอน

จากรูปที่ 92-94 พบว่า เมื่อค่าความหนืดจลน์ของ R-123 เปลี่ยนไปเป็นน้ำ และเอทานอล ความต้านทานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนืดจลน์ของของเหลวเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานของการไหลจะเพิ่มขึ้นทำให้การไหลจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้ช้าลง อัตราการถ่ายความร้อนจึงมีค่าลดลง โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ คำเมืองลี [22] ที่ได้ทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ค่าได้แก่ 1.07, 1.50 และ 2.03 มิลลิเมตร สารทำงานที่ใช้คือ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น ความหนาแน่นความร้อนป้อนให้ใน

แต่ละแหล่งความร้อนที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 1, 3 และ 5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร มุมเอียงการทำงานคือ 0 องศา พบว่า เมื่อความหนืดจลน์ของของเหลวเพิ่มขึ้น ความต้านทานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของสารทำงานมีแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามความหนืดจลน์ของสารทำงาน สถานะของเหลวส่งผลต่อระบบการไหลเวียนของสารทำงาน เช่น สารทำงานเปลี่ยนจาก R-123 เป็น เอทานอล ค่าความหนืดของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงเฉือนในของเหลวเพิ่มขึ้น การไหลเวียนของสารทำงานจึงต้องการแรงขับ (Driving force) เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ สารทำงานจึงต้องมีปริมาตรและระยะเวลาในการยวบตัวและขยายตัวของฟองไอในส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหยเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การไหลเวียนของสารทำงานมีความไม่ต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ นิตี คำเมืองลือ [22] สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความหนืดจลน์ของของเหลวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ระบบการไหลของสารทำงานมีแรงเฉือนและแรงเสียดทานการไหลเพิ่มขึ้นทำให้สารทำงานไหลไปถ่ายเทความร้อนได้ไม่ต่อเนื่องและไหลได้ช้าลง ส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าลดลง

จากงานวิจัยนี้ที่ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่วางชุดทดลองในแนวนอนเป็นการออกแบบชุดทดลองที่ประยุกต์มาจากการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง จึงได้มีการเปรียบเทียบผลของค่าความต้านทานความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูประหว่างแหล่งรับความร้อนสองแหล่งกับแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ทำการศึกษาท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปที่มีความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส สารทำงานคือ เอทานอลและน้ำ โดยผลการเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 95

แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ
ที่วางชุดทดลองในแนวนอน $D_i = 2.03$ มม

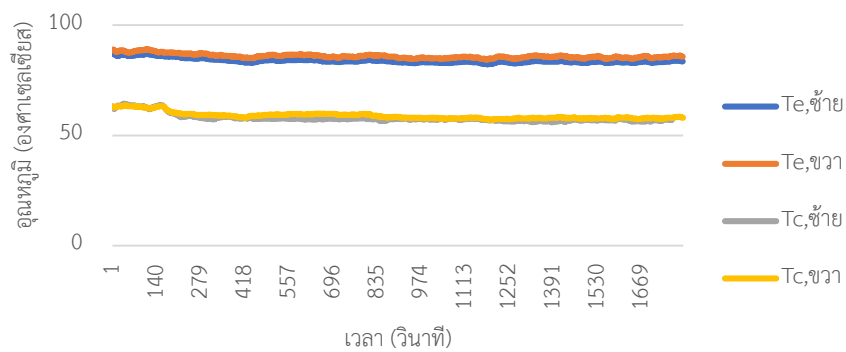


รูปที่ 95 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่วางชุด
ทดลองในแนวนอน $D_i = 2.03$ มม

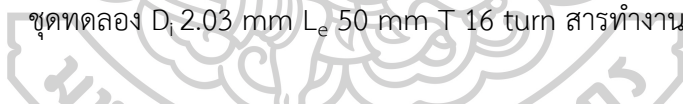
จากรูปที่ 95 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่วางชุดทดลองในแนวนอน $D_i = 2.03$ มม ของสารทำงานเอทานอลและน้ำ พบว่า ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่งมีค่าความดันด้านความร้อนต่ำกว่าท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่แหล่งรับความร้อนสองแหล่ง เนื่องจากรูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อ อธิบายได้จากรูปที่ 96 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิบริเวณต่างๆของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ พบว่า อุณหภูมิส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่นบริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองด้าน เมื่อนำมาวิเคราะห์เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นทั้งด้านซ้ายและด้านขวาดังรูปที่ 97 พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งด้านซ้ายและด้านขวามีค่าที่ใกล้เคียงกันทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งสองด้าน สารทำงานภายในจึงมีการไหลแบบสัณกลับไปกลับมาตามหลักการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ ซึ่งโดยปกติการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบจะมีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง การถ่ายเทความร้อนจะรับความร้อนจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นเป็นวัฏจักรแบบนี้ซึ่งสมรรถนะทางความร้อนจะมีค่าสูงแต่เนื่องจากชุดทดลองมีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งนั้นคือ มีส่วนทำระเหยติดตั้งบริเวณปลายทั้งสองด้านและมีส่วนควบแน่นติดตั้งบริเวณตรงกลางเพื่อระบายความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านซ้ายและด้านขวาที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความดันด้านซ้ายและ

ด้านขวามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 98 ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งมีการไหลเวียนของสารทำงานไม่ดีเท่ากับท่อความร้อนแบบสัณวงรอบปกติ เนื่องจากเกิดสมดุลความดันภายในท่อระหว่างด้านซ้ายและด้านขวาทำให้เกิดความดันผลักดันจึงส่งผลต่อไหลเวียนของสารทำงาน ดังนั้นสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งมีค่าต่ำกว่าท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนหนึ่งแหล่ง

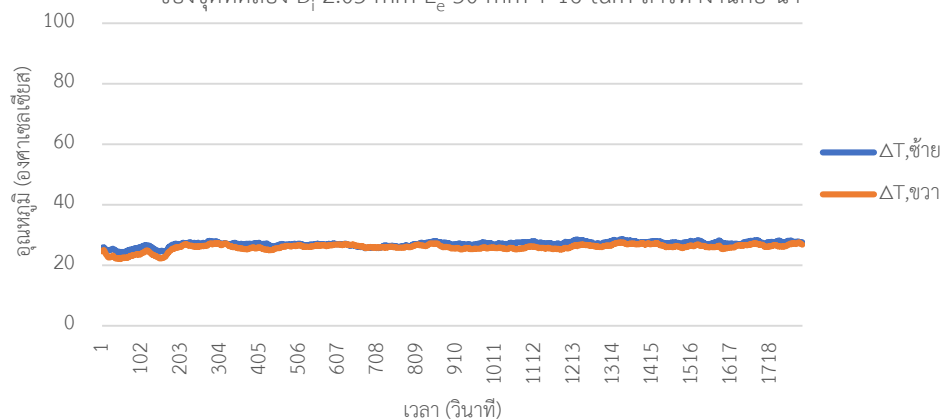
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ของชุดทดลอง D_i 2.03 mm L_e 50 mm T 16 turn สารทำงานคือ น้ำ



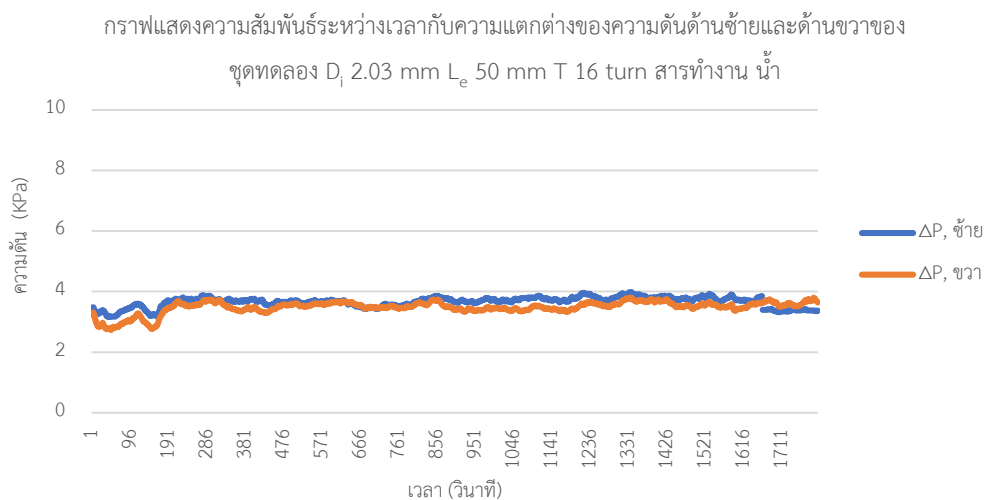
รูปที่ 96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ของชุดทดลอง D_i 2.03 mm L_e 50 mm T 16 turn สารทำงานคือ น้ำ



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับผลต่างของอุณหภูมิด้านซ้ายและด้านขวาของชุดทดลอง D_i 2.03 mm L_e 50 mm T 16 turn สารทำงานคือ น้ำ



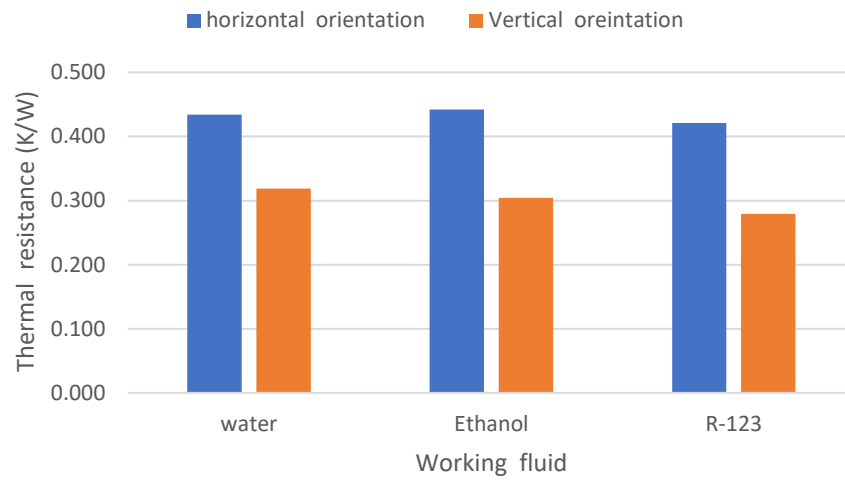
รูปที่ 97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับผลต่างอุณหภูมิด้านซ้ายและด้านขวาของชุดทดลอง D_i 2.03 มม L_e 50 มม T 16 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ



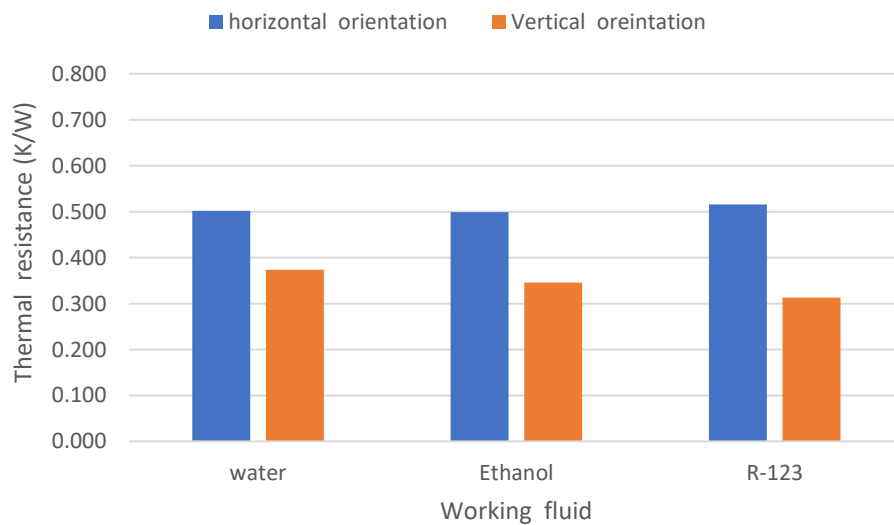
รูปที่ 98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแตกต่างของความดันด้านซ้ายและด้านขวาของชุดทดลอง D_i 2.03 มม L_c 50 มม T 16 โค้งเลี้ยว สารทำงานคือ น้ำ

4.3 ผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปวงรีที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

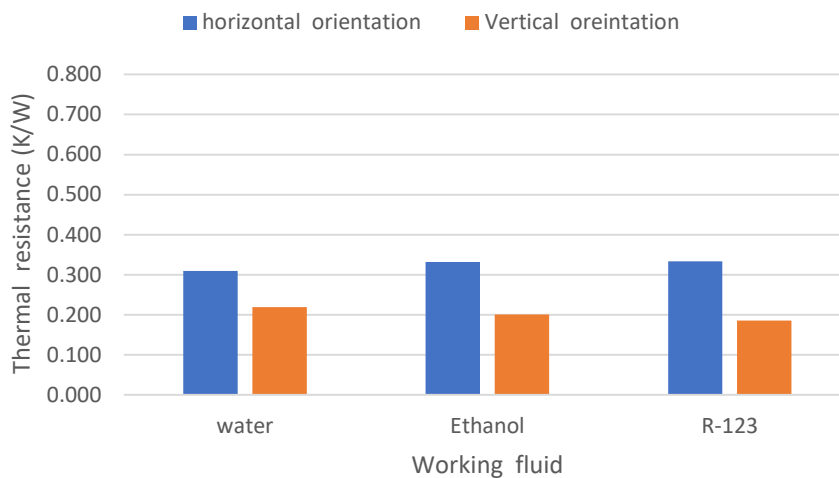
เนื่องจากชุดทดลองทั้งหมดมีจำนวนชุดการทดลอง 27 ชุด ทดลองเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรูปวงรีที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งที่ทดลองวางแนวตั้งและแนวนอนเพื่อเปรียบเทียบผล รูปที่ 99-101 แสดงตัวอย่างผลการทดลองวางแนวชุดทดลองกับความต้านทานความร้อนของแต่ละสารทำงาน โดยชุดการทดลองที่นำมาเป็นตัวอย่างมีทั้งหมด 3 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดที่ 1 ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม ชุดที่ 2 ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม และชุดที่ 3 ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม ดังนี้



รูปที่ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 1 ความยาวส่วนทำระเหย 50 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม



รูปที่ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 2 ความยาวส่วนทำระเหย 100 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มม



รูปที่ 101 ความสัมพันธ์ระหว่างการวางแนวชุดทดลองกับค่าความต้านทานความร้อน ของชุดที่ 3 ความยาวส่วนทำระเหย 150 มม จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มม

จากรูปที่ 99-101 พบว่า การวางชุดทดลองในแนวตั้งมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำกว่า การวางชุดทดลองในแนวนอนทุกสารทำงาน ทำให้สมรรถนะทางความร้อนของการวางชุดทดลองในแนวตั้งดีกว่าแนวนอน เนื่องจากการวางแนวตั้ง สารทำงานภายในท่อเมื่อถ่ายเทความร้อน เกิดการควบแน่นจากฟองไอกกลายเป็นแท่งของเหลวและไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลต่อการไหลของสารทำงาน สำหรับการวางแนวนอนสารทำงานภายในท่อที่ควบแน่นเป็นแท่งของเหลวจะไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยได้ช้ากว่า หรือมีการไหลแบบสั่นกลับไปกลับมา เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง โดยผลการที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang et al. [17] ที่ได้ทดลองท่อความร้อนแบบสั่นงอกรอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 และ 2 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว ใช้สารทำงานคือ R-123 อัตราส่วนการเติม 30%, 50% และ 70% โดยปริมาตรท่อทั้งหมด ทดลองการวางแนวนอนและแนวตั้ง พบว่า การทดลองวางในแนวตั้งมีความต้านทานความร้อนน้อยกว่าการวางแนวนอน เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ที่มีผลต่อการไหลของสารทำงาน นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา นิตติ คำเมืองสือ [22] พบว่า สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนเมื่อเปลี่ยนจากการวางในแนวตั้งเป็นการวางในแนวนอนจะมีค่าลดลง เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในท่อเปลี่ยนจากการไหลในทิศทางเดียวโดยสมบูรณ์ ไปเป็นการไหลแบบสั่นกลับไปกลับมาที่มีการหยุดชั่วขณะ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ต่อเนื่อง ทำให้ความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทลดลงตลอดจนผลต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของการวางแผนของชุดทดลองในแนวดิ่งจะทำให้สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฆรวรอบที่แหล่งรับความร้อนสองแหล่งดีกว่าการวางชุดทดลองในแนวนอน เนื่องจากรูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อและอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งวางตัวในแนวตั้ง

- เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้นจาก 1.07, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อจะทำให้พื้นที่รับความร้อนและพื้นที่ระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดการไหลภายในท่อ ทำให้สารทำงานเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนยังส่วนควบแน่นได้ง่ายขึ้นและปริมาณมากขึ้น สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าสูงขึ้น
- เมื่อความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจาก 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าลดลง เนื่องจากความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่ในการรับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้แท่งของเหลวสามารถระเหยกลายเป็นฟองไอและไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นที่สูงขึ้นจะไม่เกิดการแห้ง (Dry out) เนื่องจากงานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหย ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สมรรถนะทางความร้อนท่อความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น
- เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มขึ้นจาก 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวมีผลต่อพฤติกรรมการณ์การไหลภายในท่อของสารทำงานและทำให้เกิดความดันสูญเสียตกคร่อมที่ท่องอและท่อตรง และเกิดแรงเสียดทานเนื่องจากไหลระหว่างสารทำงานกับผิวท่อ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าลดลง
- เมื่อค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นจาก 161, 1,000 และ 2,382 กิโลจูลต่อกิโลกรัม สำหรับ R-123 เอทานอล และน้ำกลั่น ตามลำดับ ความต้านทานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำเป็นสารทำงานที่พบว่าค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอมีค่ามากกว่า R-123 กับเอทานอล จึงทำให้น้ำใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะเป็นฟองไอนานกว่า หลังจากนั้นจึงไหลไปยังส่วนควบแน่นทำให้อุณหภูมิส่วนทำระเหยสูงขึ้น ผลต่างระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนจึงมีค่าลดลง

5.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งวางตัวในแนวนอน

- เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเพิ่มขึ้นจาก 1.07, 1.5 และ 2.03 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อนั้นจะเพิ่มพื้นที่รับความร้อนแก่สารทำงานและเพิ่มพื้นที่หน้าตัดการไหลของสารทำงาน ทำให้สารทำงานสามารถไหลเวียนภายในท่อความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้อย่างต่อเนื่องและปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้น
- เมื่อความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจาก 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ลดลง เนื่องจากความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่ในการรับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้แท่งของเหลวสามารถระเหยกลายเป็นฟองไอและไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นที่สูงขึ้นจะไม่เกิดการแห้ง (Dry out) เนื่องจากงานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหย ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สมรรถนะทางความร้อนต่อความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น
- จำนวนโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้นจาก 16, 32 และ 40 โค้งเลี้ยว จะทำให้ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น เพราะทำให้เกิดความดันตกคร่อมทางการไหลเนื่องจากความสูญเสียหลักและความสูญเสียรองเพิ่มขึ้น ทำให้สารทำงานไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้ช้าลง อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง จึงส่งผลให้มีสมรรถนะทางความร้อนมีค่าลดลง
- เมื่อความหนืดจลน์ของของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 316, 547 และ 703 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ สำหรับสารทำงาน R-123 น้ำกลั่น และเอทานอล ตามลำดับ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบการไหลของสารทำงานภายในท่อมืดแรงเฉือนและแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้สารทำงานไหลจากส่วนทำระเหยไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นไม่ต่อเนื่องและช้าลง ส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าลดลง

5.3 ผลการเปรียบเทียบการวางแนวชุดทดลองที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฆรวรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง

ผลของการวางแนวของชุดทดลองในแนวตั้งจะทำให้สมรรถนะทางความร้อนดีกว่าการวางชุดทดลองในแนวนอน เนื่องจากในการวางแนวตั้ง อิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงมีผลต่อการไหลของสารทำงานภายในท่อ ทำให้สารทำงานสถานะแห้งของเหลวรับความร้อนจากส่วนทำระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นฟองไอลไหลไปถ่ายเทความร้อนยังส่วนควบแน่นและเกิดการควบแน่นเปลี่ยนสถานะฟองไอลกลายเป็นแห้งของเหลวและไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันการวางแนวนอน สารทำงานภายในท่อที่ควบแน่นเป็นแห้งของเหลวจะไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยได้ช้ากว่า เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในท่อกับการไหลแบบสัณฆรวรอบไปกลับไปและมีการหยุดชั่วขณะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฆรวรอบจึงมีค่าลดลง

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1. เนื่องจากการทดลองหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฆรวรอบ ที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่งเป็นการออกแบบขึ้นมาใหม่ซึ่งมีความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร และความยาวส่วนควบแน่น 100 มิลลิเมตร คงที่ ซึ่งโดยทั่วไปในการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฆรวรอบจะกำหนดให้มีความยาวส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเท่ากัน ดังนั้นควรทำการทดลองโดยออกแบบให้มีความยาวของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเท่ากันเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลของการศึกษาในงานวิจัยนี้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ,m
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ,m/s ²
L _e	ความยาวส่วนทำระเหย ,m
L _c	ความยาวส่วนควบแน่น ,m
L _a	ความยาวส่วนอะเดียแบติก ,m
A	พื้นที่ส่วนควบแน่น ,m ²
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล ,Kg /s
h	ค่าเอนทัลปีต่อหน่วยมวลอากาศแห้ง ,KJ/Kg
V	ความเร็วลมของอากาศ ,m/s
A	พื้นที่หน้าตัดการไหลของส่วนควบแน่น ,m ²
r	รัศมีของท่อความร้อน ,mm
l	ความยาวท่อตรงในส่วนควบแน่น ,mm
N	จำนวนโค้งเลี้ยว ,โค้งเลี้ยว
\dot{Q}	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ,kW/s
T	อุณหภูมิ ,°C
\dot{q}	ค่าความหนาแน่นความร้อน ,W/m ²
R	ค่าต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ,K-m ² /W
R'	ค่าความต้านทานความร้อน ,K/W
C _p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ,KJ / Kg·°C
K _a	Karman number
P _r	Prandtl number
J _a	Jakob number

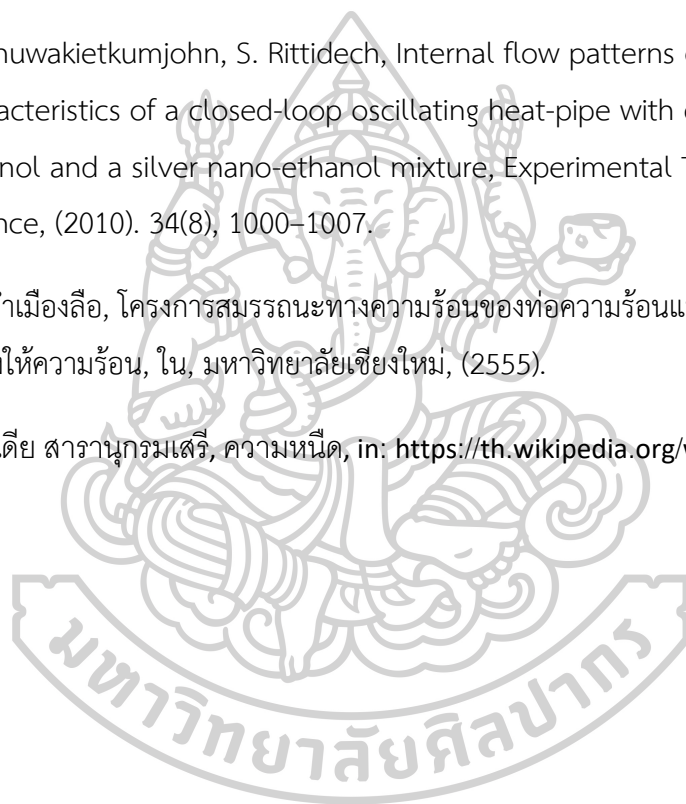
ตัวย่อ	ความหมาย
i	ภายในท่อความร้อน
i,crit	ภายในท่อวิกฤต
cond	การนำความร้อน
air	อากาศแห้ง
in	ทางเข้า
out	ทางออก
ar	รัศมีความโค้งงอของท่อ
inlet	ภายใน
outlet	ภายนอก
fg	ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ
liq	ของเหลว
e	ส่วนทำระเหย
c	ส่วนควบแน่น
a	ส่วนอะเดียแบติก
สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ ,Kg /m ³
μ_l	ความหนืดจลน์ของของเหลว , μ Pa·s
B	มุมเอียงการทดลองจากแนวนอน ,เรเดียน

รายการอ้างอิง

- [1] H. Akachi, F. Polásek, P. Štulc, Pulsating heat pipes, in: Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium, (1996) 208–217.
- [2] S. Maezawa, K. Minamisawa, A. Gi, H. Akachi, Thermal performance of capillary tube thermosiphon, in: Proceeding of the 9th International Heat Pipe Conference, (1995) 791-795.
- [3] B. Verma, L.Y. Vijay, K.S. Kaushal, Experimental studies on thermal performance of a pulsating heat pipe with methanol/DI water, Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 3 (2013) 27-34.
- [4] N. Kammuang-Lue, P. Sakulchangsattajai, P. Terdtoon, Effect of working fluids and internal diameters on thermal performance of vertical and horizontal closed-loop pulsating heat pipes with multiple heat sources, Thermal Science, 20 (2016).
- [5] P. Charoensawan, P. Terdtoon., Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes, Applied Thermal Engineering, 28 (2008) 460–466.
- [6] P. Charoensawan, P. Terdtoon, P. Tantakom, P. Ingsuwan, M. Groll, Effect of Inclination Angles, Filling Ratios and Total Lengths on Heat Transfer Characteristics of a Closed-Loop Oscillating Heat Pipe, in Proceeding of the 6th International Heat Pipe Symposium, (2000).
- [7] P. Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, P. Terdtoon, Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations, Applied thermal engineering, 23 (2003) 2009-2020.
- [8] N. Kammuang-lue, K. On-ai, Phrut Sakulchangsattajai, Pradit Terdtoon, Correlation to Predict Thermal Performance According to Working Fluids of Vertical Closed-Loop Pulsating Heat Pipe, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and

- Mechatronics Engineering, 8 (2014).
- [9] D. A. Reay, P.A. Kew, Special types of heat pipes. heat pipes, Fifth Edition, Chapter 6, (2006).
- [10] Kutz M. Pulsating Heat Pipes. Mechanical Engineers; Handbook, Energy and Power, Third Edition, Book 4, Chapter 9, 2006.
- [11] Katoh T., Xu G., Voge M., Novotny S. New Attempt of Forced-Air Cooling for High Heat-Flux Applications, Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp 34-39, (2004)
- [12] Rittidech S., Terdtoon P., Murakami M., Kamonpet P., Jompakdee W. Correlation to Predict Heat Transfer Characteristics of a Close-End Oscillating Heat Pipe at Normal Operating Condition, Applied Thermal Engineering, vol. 23, pp 497-510, (2003)
- [13] Karimi G., Culham J.R. Review and Assessment of Pulsating Heat Pipe Mechanism for High Heat Flux Electronic Cooling, Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp 52-58, (2004).
- [14] Qu W., Ma H. B. Theoretical Analysis of Startup of a Pulsating Heat Pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp 2309-2316, (2007).
- [15] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, คุณสมบัติของสารทำงาน, in: <https://th.wikipedia.org/wiki/คุณสมบัติของสารทำงาน>, (2015)
- [16] G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, Process heat transfer, (1993), CRC Press, Boca Raton, Florida, United State of America
- [17] H.Yang, S. Khandekar, M. Groll, Operational limit of closed loop pulsating heat pipes, Applied Thermal Engineering, 28 (2008) 49-59.
- [18] K. Gi, S.M, CPU cooling of notebook PC by oscillating heat pipe, in: Proceedings of the 11th International Heat Pipe Conference, (1999).

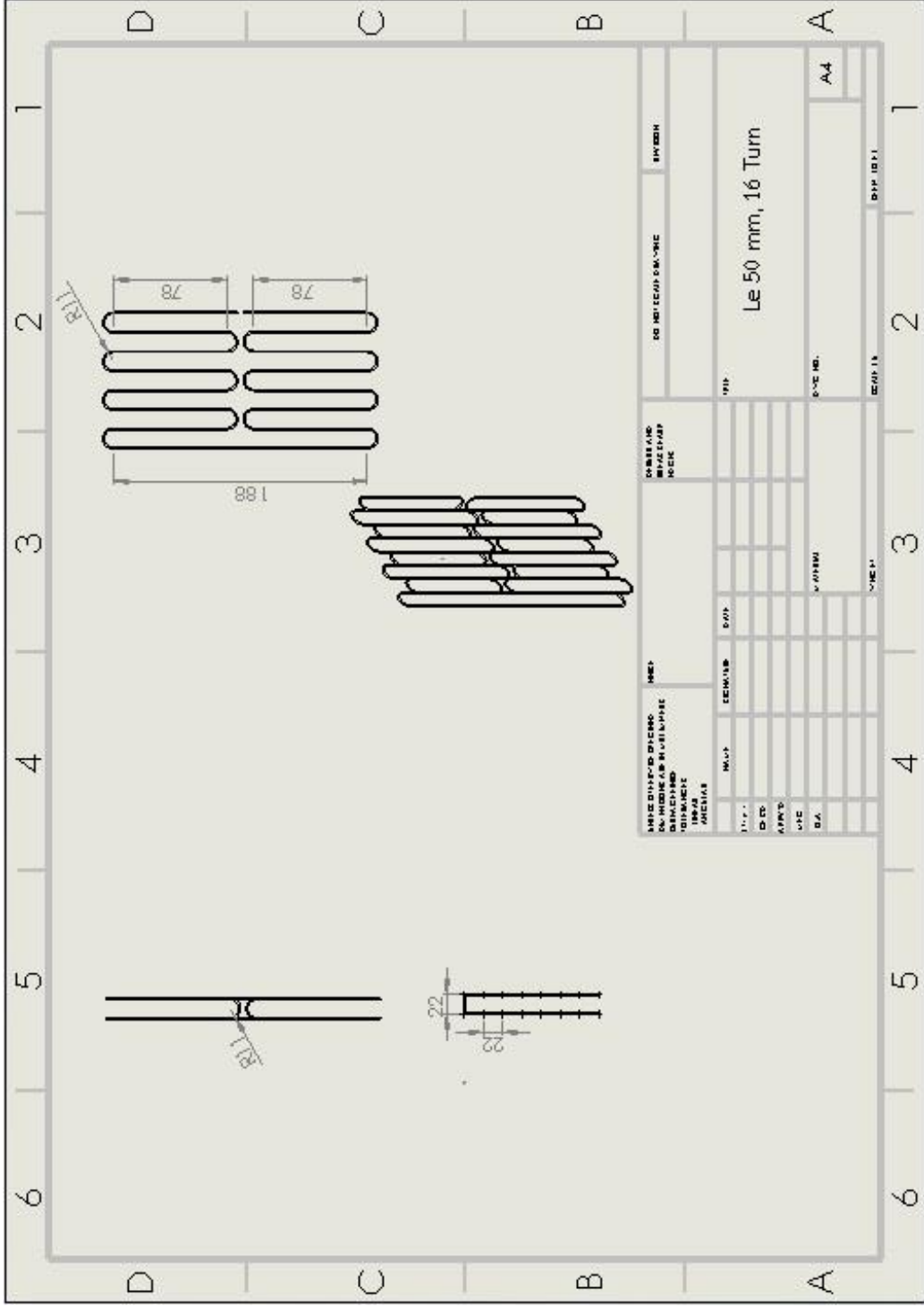
- [19] Piyapong Suvunnajun¹, N.K.-l., Phrut Sakulchangsattajai¹, Pradit Terdtoon¹, Effect of Working fluids on Thermal Performance of Vertical Closed-loop Pulsating Heat pipe. (2016). 35(3) 332-337.
- [20] N. KAMMUANG-LUE, P. SAKULCHANGSATJATAI, C. SRIWISSET, P. TERDTON, INVESTIGATION AND PREDICTION OF OPTIMUM MEANDERING TURN NUMBER OF VERTICAL AND HORIZONTAL CLOSED-LOOP PULSATING HEAT PIPES, Thermal Science, (2016).
- [21] N. Bhuwaketkumjohn, S. Rittidech, Internal flow patterns on heat transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves using ethanol and a silver nano-ethanol mixture, Experimental Thermal and Fluid Science, (2010). 34(8), 1000–1007.
- [22] นิตติ คำเมืองลือ, โครงการสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีหลายแหล่งให้ความร้อน, ไข, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, (2555).
- [23] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, ความหนืด, in: <https://th.wikipedia.org/wiki/ความหนืด>, (2019).



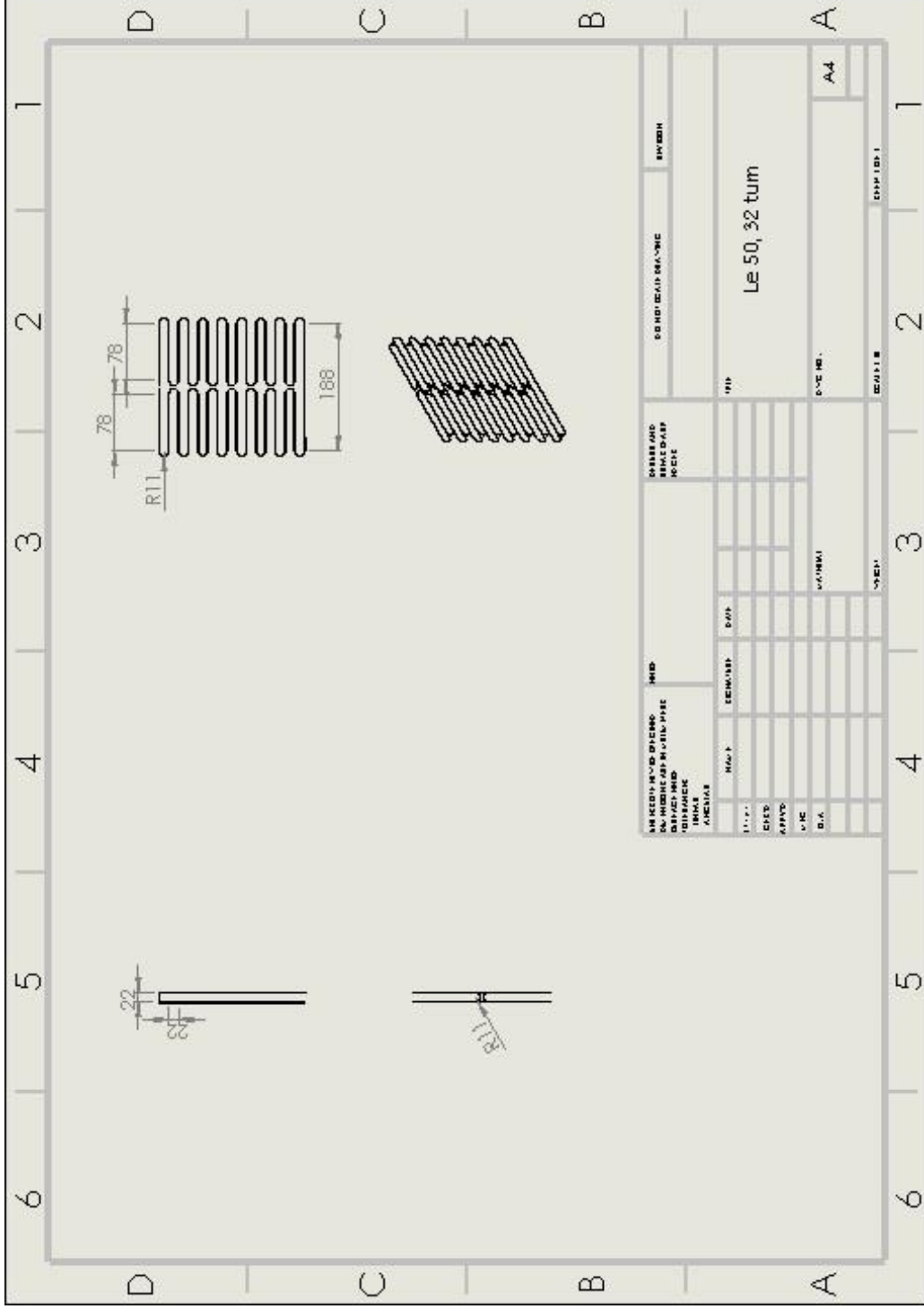


ภาคผนวก ก.

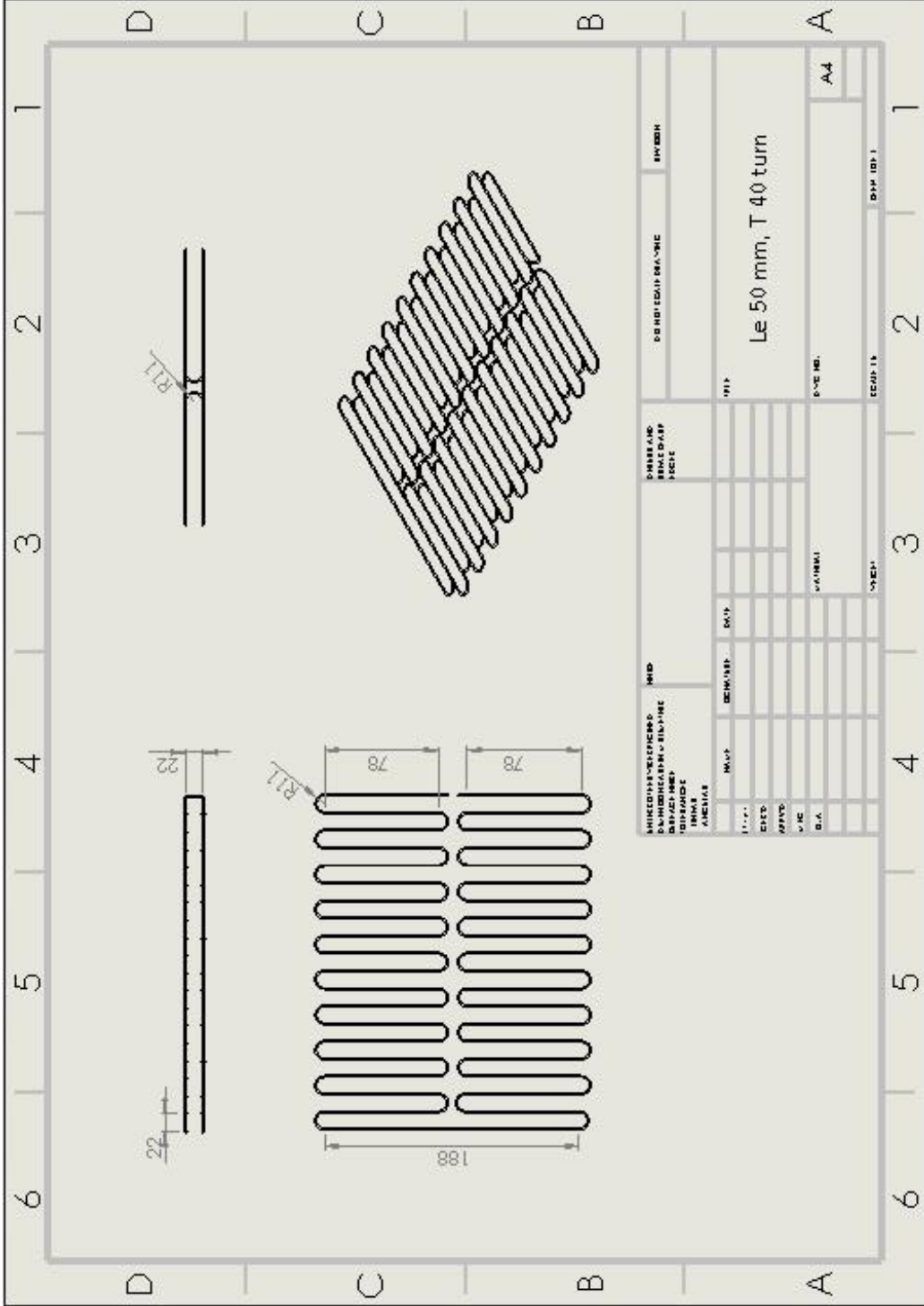
แบบทางวิศวกรรมของชุดทดลอง



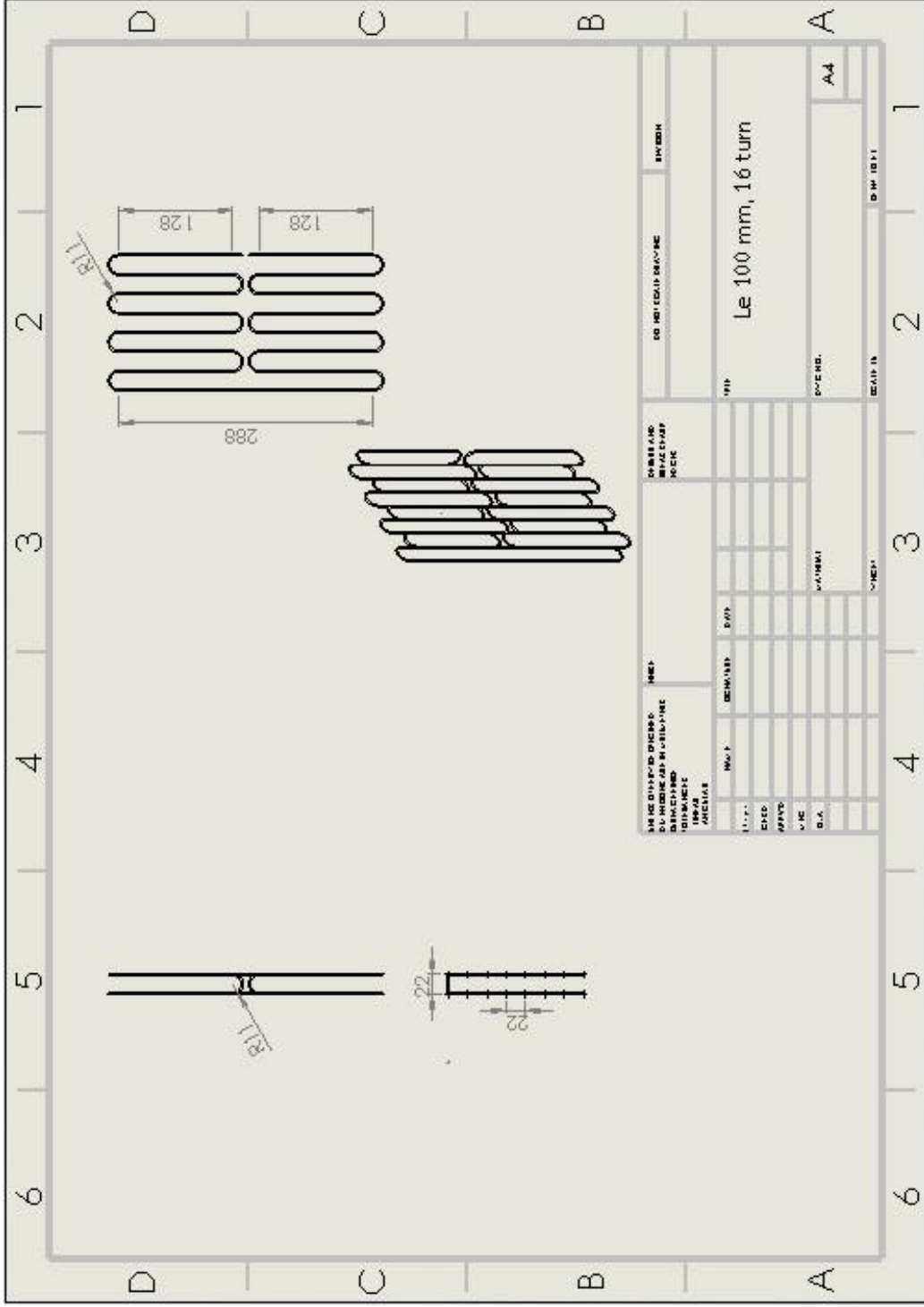
รูปที่ ก.1 แบบตัดต่อคอบลิตำของแฉง Le 50 mm, Turn 16 turn



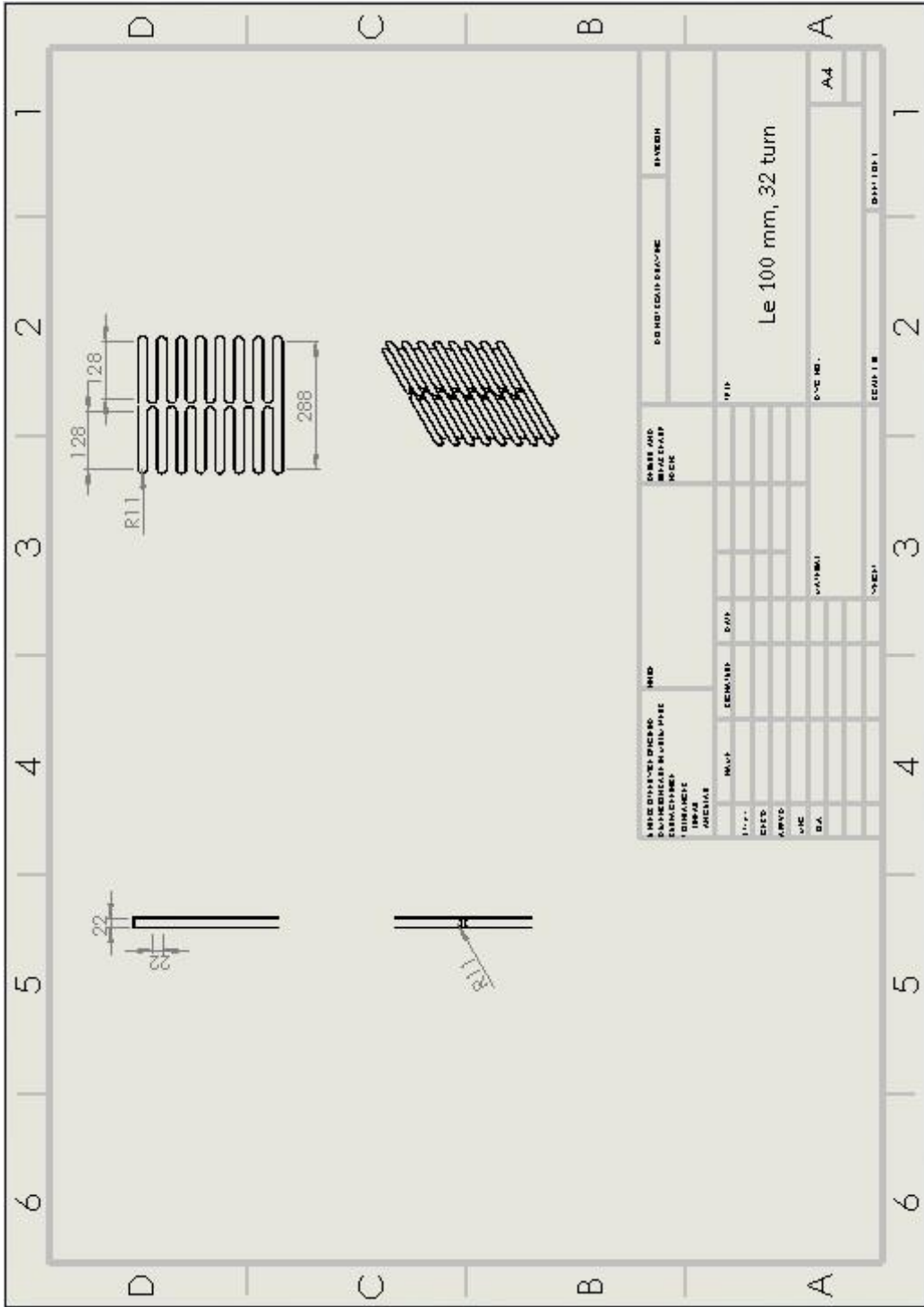
รูปที่ ก.2 แบบตัดต่อคาลิลารทองแดง Le 50 mm, Turn 32 tum



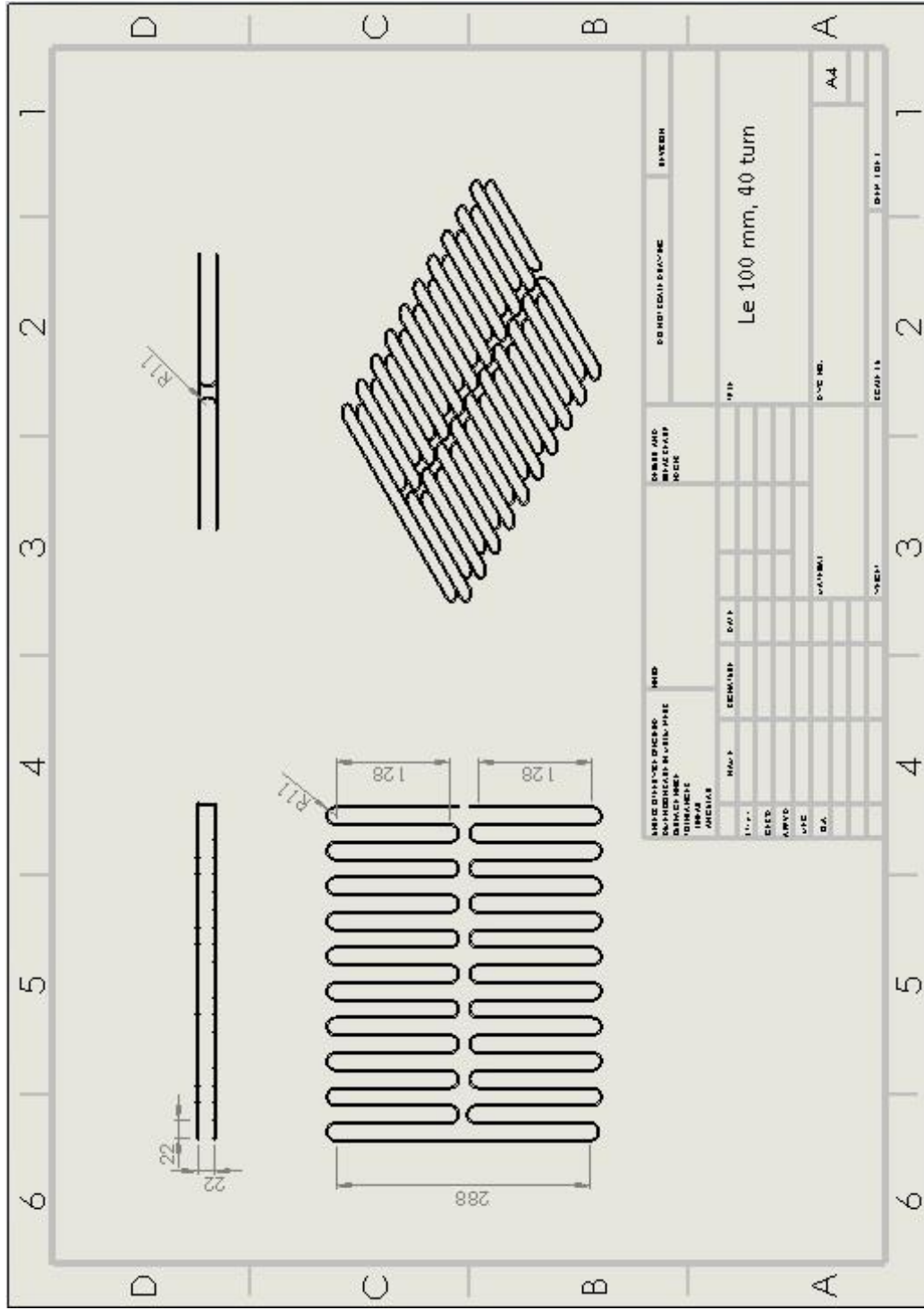
รูปที่ ก.3 แบบตัดต่อคาบลีลาวีทองแดง Le 50 mm, Turn 40 turn



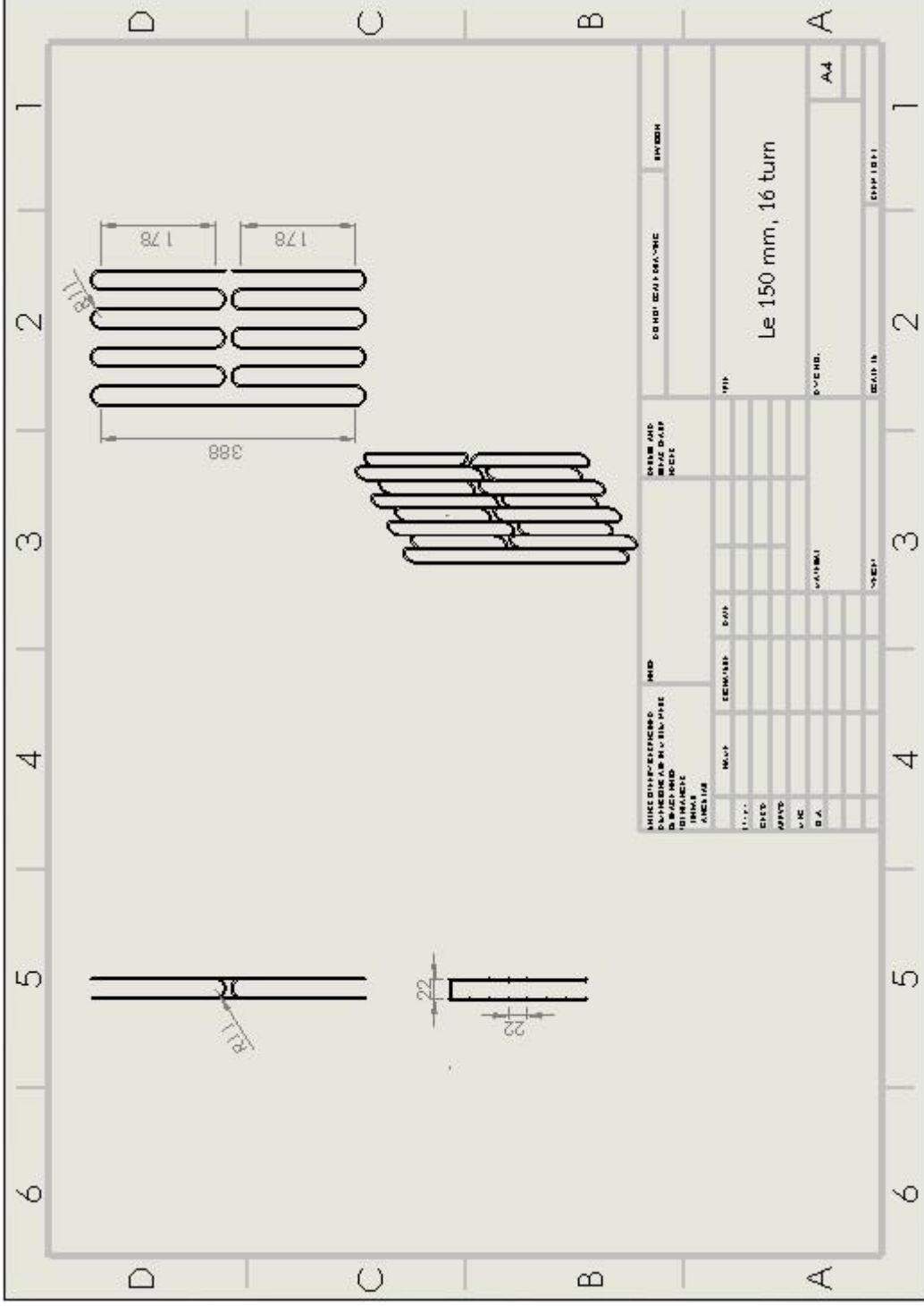
รูปที่ ก.4 แบบตัดท่อนคานปลักริทองแดง Le 100 mm, Turn 16 turn



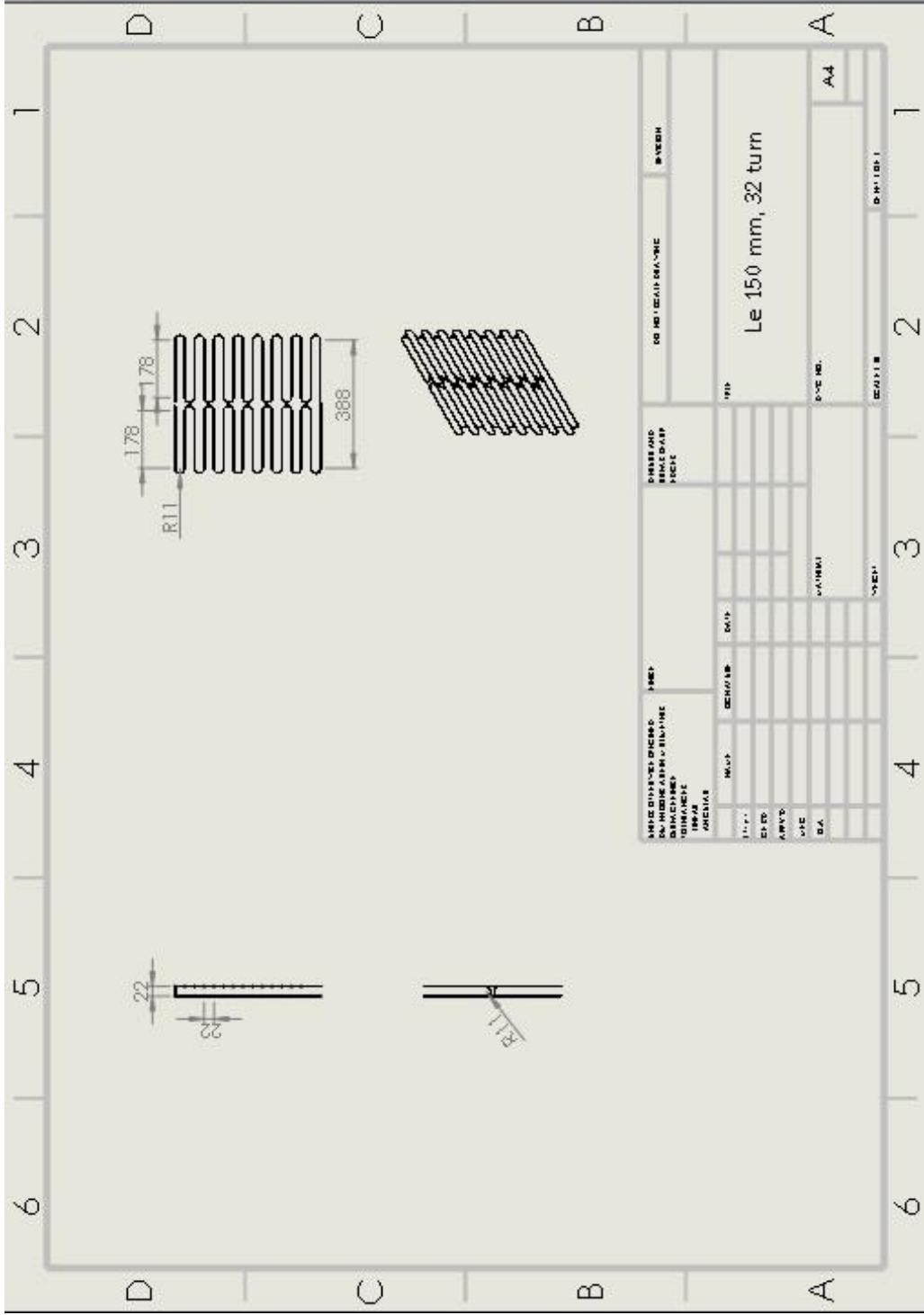
รูปที่ 3-5 แบบตัดท่อนาคาลิราทองแดง Le 100 mm, Turn 32 turn



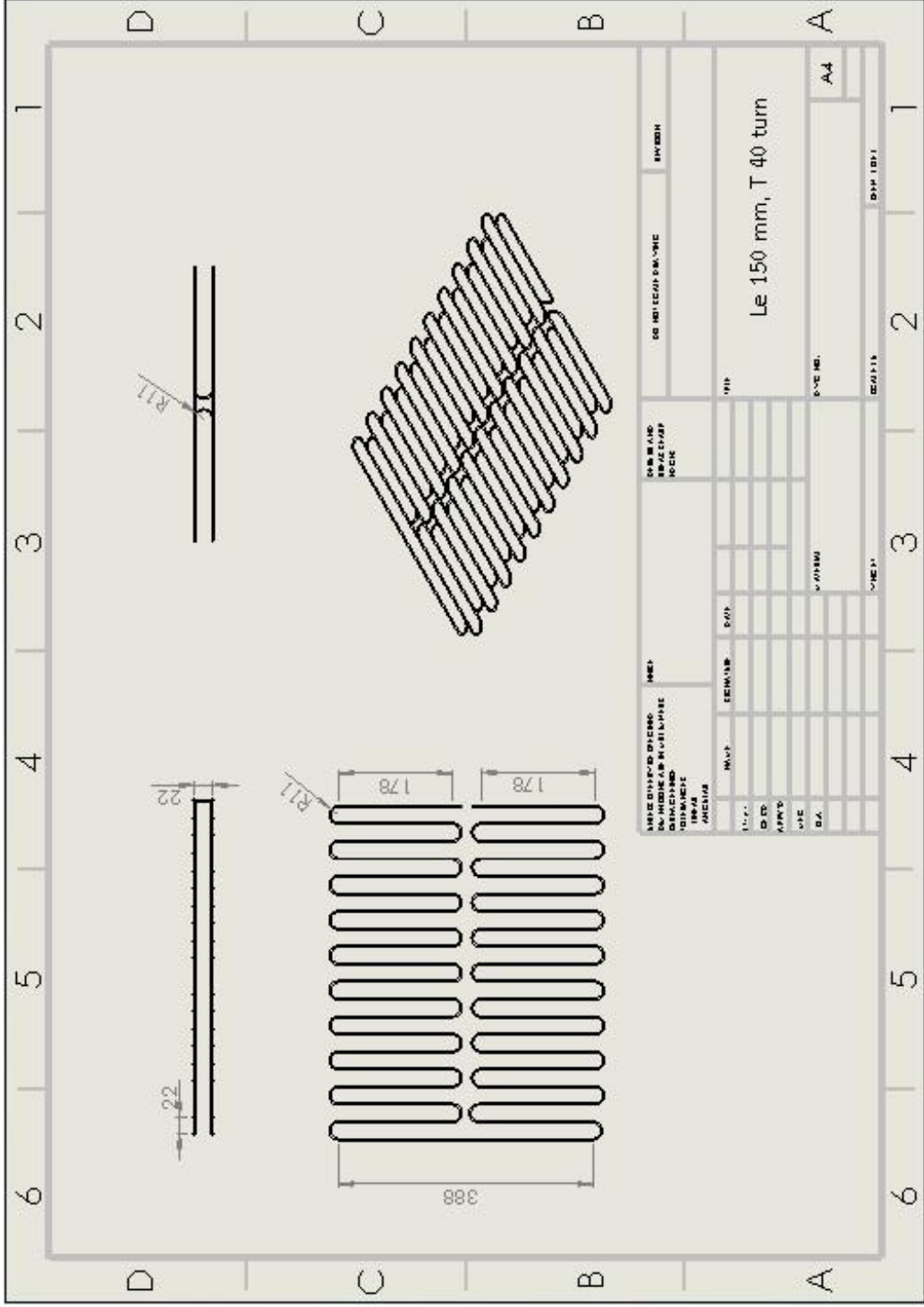
รูปที่ ก.6 แบบตัดท่อคานาบลีทองแดง Le 100 mm, Turn 40 turn



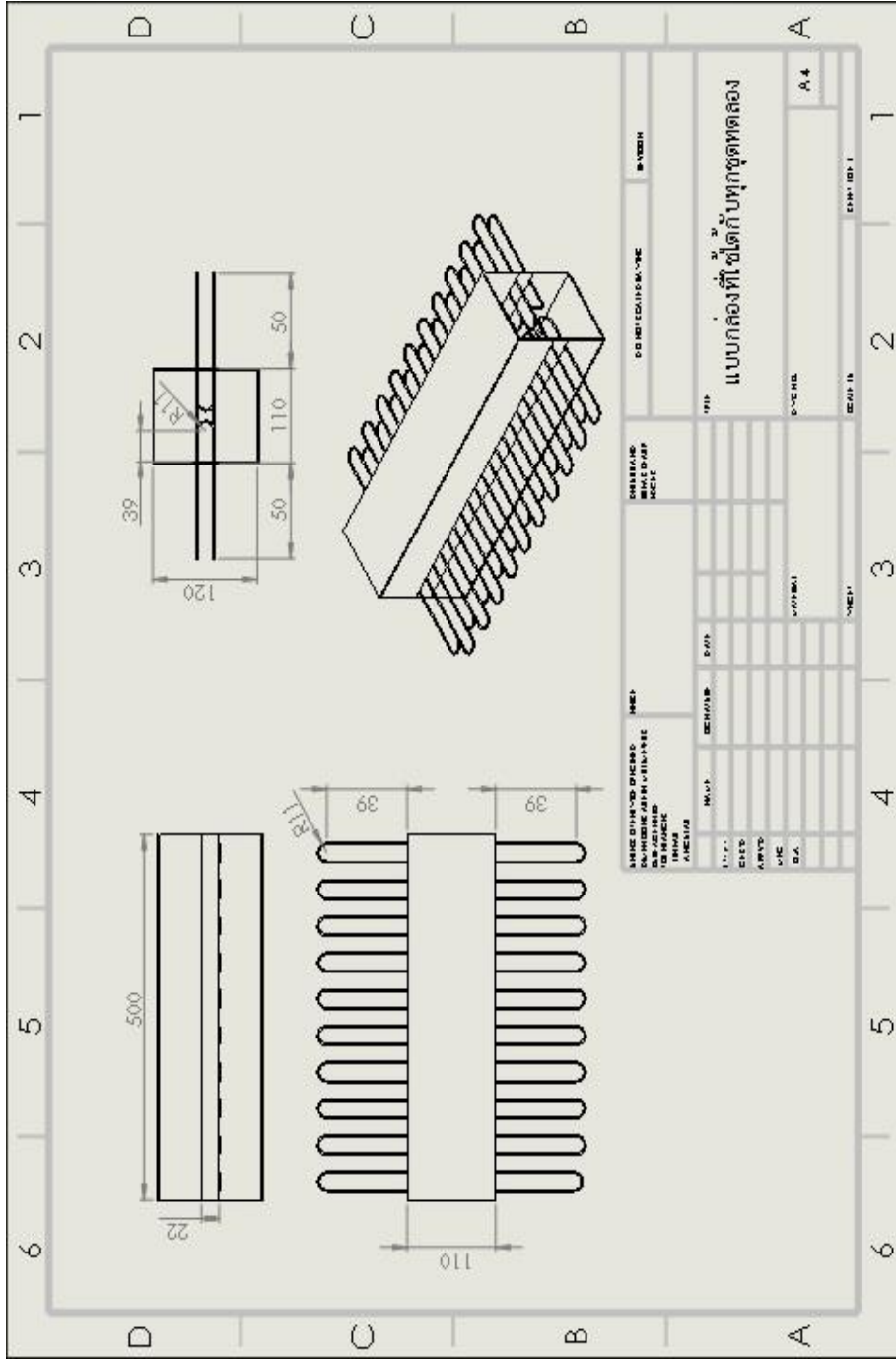
รูปที่ ก.7 แบบตัดต่อท่อคาบลีลาทองแดง Le 150 mm, Turn 16 turn



รูปที่ ก.8 แบบตัดเพื่อคานับลิตารีทองแดง Le 150 mm, Turn 32 turn



รูปที่ ก.9 แบบตัดต่อคานาบลีร็องแตง Le 150 mm, Turn 40 turn



รูปที่ ก.4 แบบกล่องชุดทดลองที่ประกอบด้วยท่อนาคาลิลารี Le 50 mm Turn 40 turn



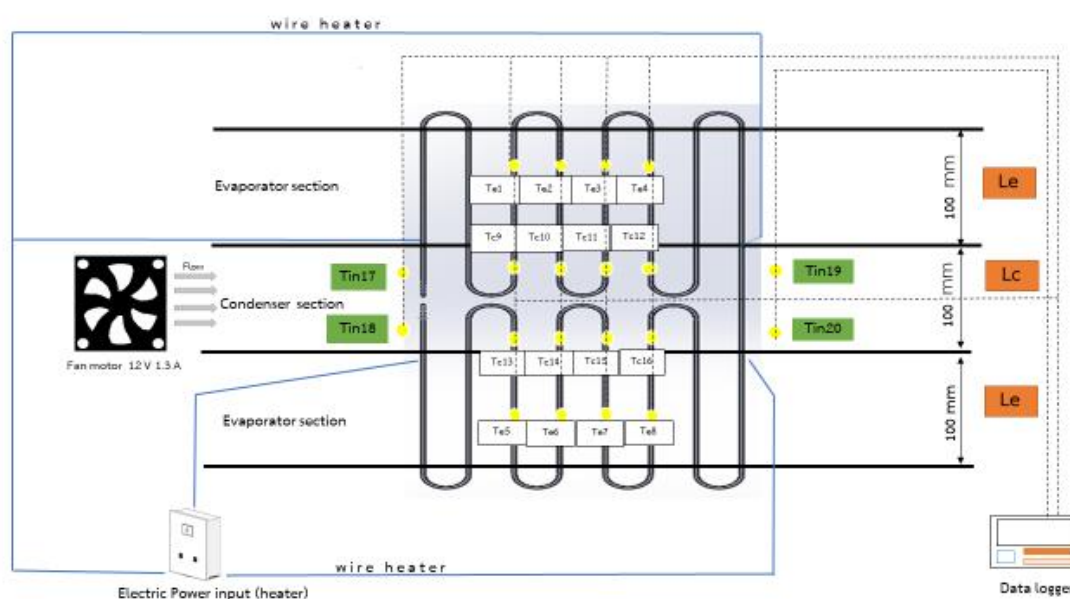
ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความหนาแน่นความร้อนและความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่เพื่อนำไป

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความหนาแน่นความร้อนและความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง มีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูล โดยจากแผงผังการบันทึกข้อมูลในรูปที่ ข.1 จะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 20 ตำแหน่ง นั่นคือ บริเวณส่วนทำระเหย 8 ตำแหน่ง บริเวณส่วนควบแน่น 8 ตำแหน่ง และบริเวณทางเข้ากับทางออก อย่างละ 2 ตำแหน่ง จากนั้นวัดความเร็วลม และความชื้นของอากาศทั้งทางเข้าละทางออก



รูปที่ ข.1 แสดงแผงผังการบันทึกผลของอุณหภูมิของชุดทดลอง

- จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าของ อุณหภูมิส่วนทำระเหย อุณหภูมิส่วนควบแน่น อุณหภูมิทางเข้า กับออก ความเร็วลมที่ระบายความร้อน ความชื้น
- หาค่าอัตราการไหลเชิงมวล \dot{m}_{air} จากสมการที่ (ข.2)
- ทำการหาค่าเอนทัลปี Enthalpy (ค่า h) ทางเข้าและทางออกโดยนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้าและทางออกกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ทางเข้าและทางออกเปิดหาค่า เอนทัลปี จากเว็บไซต์ <http://www.flycarpet.net> เมื่อได้ค่า h ที่ทางเข้าและทางออกแล้ว นำไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ (ข.1) หาค่าความหนาแน่นความร้อนจากสมการที่ (ข.3)
- จากนั้นหาค่าความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่จากสมการที่ (ข.5)

6. ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์กับค่าความหนาแน่นความร้อน หรือพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์กับค่าความต้านทานความร้อนต่อพื้นที่ จากนั้นวิเคราะห์ผลและอภิปรายผลการทดลอง

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สมการหาค่าการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{air}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่

\dot{Q} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อน หน่วย W/s

h_{in} คือ ค่าเอนทัลปีต่อหน่วยมวลอากาศแห้ง ณ ทางเข้า หน่วย KJ/Kg (อุณหภูมิ T_{17}, T_{18})

h_{out} คือ ค่าเอนทัลปีต่อหน่วยมวลอากาศแห้ง ณ ทางออก หน่วย KJ/Kg (อุณหภูมิ T_{19}, T_{20})

ส่วน \dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลต่อมวลอากาศแห้ง หน่วย Kg/s หาได้จาก สมการนี้

$$\dot{m}_{\text{air}} = \rho VA \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

\dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวล หน่วย Kg/s

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย Kg/m³

V คือ ความเร็วลมของอากาศ หน่วย m/s

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของส่วนควบแน่น หน่วย m²

ค่าความหนาแน่นความร้อนหาได้จากการนำสมการที่ ข.1 มาหารด้วยพื้นที่ที่ถูกระบายความร้อนนั้นคือ พื้นที่ของส่วนควบแน่น

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_{\text{cond}}} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่

\dot{q} คือ ค่าความหนาแน่นความร้อน หน่วย W/m²

A_{cond} คือ พื้นที่ส่วนที่ระบายความร้อน หรือพื้นที่ส่วนควบแน่น หน่วย m²

การหาค่าพื้นที่ส่วนควบแน่น หาจากสมการที่ ข.4

$$A_{\text{cond}} = \frac{((\text{พื้นที่ส่วนท่อโค้ง}) + (2 \times \text{พื้นที่ส่วนท่อตรง})) \times \text{จำนวนโค้งแล้ว}}{10000} \quad (\text{ข.4})$$

$$A_{\text{cond}} = \frac{((\pi^2 \times D_o \times r_a) + (2 \times \pi \times D_o \times L)) \times \text{Turn}}{10000}$$

โดยที่

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก หน่วย mm

r_a คือ รัศมีความโค้งของท่อ หน่วย mm ในงานวิจัยนี้มีค่า 11 mm

L คือ ความยาวท่อตรงในส่วนควบแน่น หน่วย mm ในงานวิจัยนี้มีค่า 3.9 mm

ค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หาได้จากสมการที่ ข.5

$$R = \frac{(T_{e,ave} - T_{c,ave})}{\dot{q}} \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่

R คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หน่วย $\frac{\text{K}\cdot\text{m}^2}{\text{W}}$

$T_{e,ave}$ คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยเฉลี่ยในทุกตำแหน่ง หน่วย $^{\circ}\text{C}$

$T_{c,ave}$ คือ อุณหภูมิของส่วนควบแน่นเฉลี่ยในทุกตำแหน่ง หน่วย $^{\circ}\text{C}$

ตัวอย่างการคำนวณ

1. จากตารางที่ ข.1 แสดงตารางบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง ที่หาค่าเฉลี่ยทั้งหมดแล้ว (เฉพาะแค่ 1 สารทำงาน)

ตารางที่ ข.1 แสดงตารางบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง

cross section area = 0.0132						
$T_{in,ave}$	$T_{out,ave}$	$T_{c,ave}$	$T_{e,ave}$	deta($T_e - T_c$)	%RH $_{in,ave}$	%RH $_{out,ave}$
26.6607	37.6997	70.4807	89.6988	19.2181	52.7	31.2

2. หาค่า Enthapy ทางเข้าและทางออก จากการนำเอา อุณหภูมิทางเข้ากับทางออกและความชื้นสัมพัทธ์ทางเข้าและทางออกไปเปิดหาค่า Enthapy ในเว็บไซต์ <http://www.flycarpet.net> จะได้ดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการหาค่าเอนทัลปี

H_{in} (KJ/Kg)	H_{out} (KJ/Kg)	detaH (KJ/Kg)
56.305	70.812	14.507

เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศเราใช้ 1.12 Kg/m^3 และ ความเร็วเฉลี่ยทั้ง 9 จุด คือ 0.36 m/s

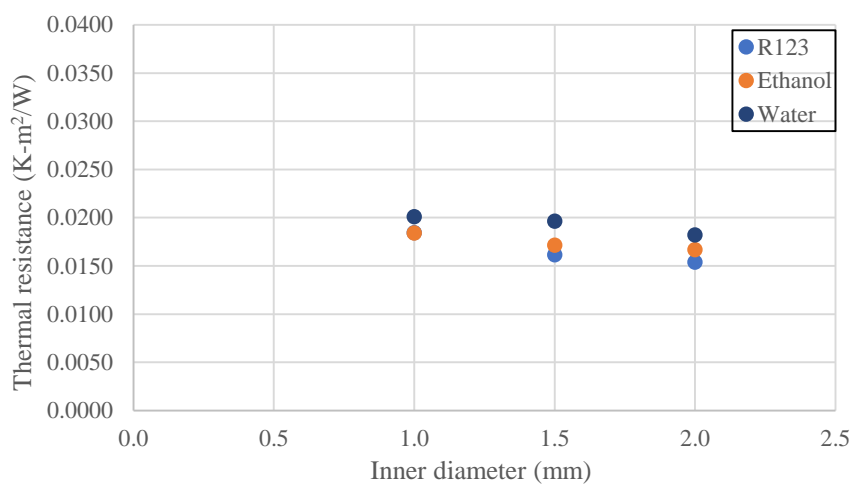
3. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลจาก สมการที่ ข.2
4. จากนั้นทำการหาค่าการถ่ายเทความร้อนจาก สมการ ข.1
5. คำนวณหาค่า พื้นที่ส่วนระบายความร้อนจาก สมการที่ ข.4
6. หาค่าความหนาแน่นความร้อนจาก สมการที่ ข.3
7. หาค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จาก สมการที่ ข.5
8. ทำการคำนวณซ้ำข้อ 1-7 ของสารทำงานที่เหลืออีก 2 สารทำงาน จนครบ 3 สารทำงาน จะได้ตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าความหนาแน่นความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว ของแต่ละสารทำงาน

Di	q (W/m ²)			q _{ave} (W/m ²)	R (K-m ² /W)				
	1	2	3		1	2	3	ave	
R-123									
1.0	2133.58	1921.73	1960.67	2005.33	0.0174	0.0189	0.0190	0.0184	
1.5	1774.69	1842.48	1796.73	1804.63	0.0148	0.0177	0.0160	0.0162	
2.0	1588.56	1262.17	987.91	1279.54	0.0165	0.0144	0.0153	0.0154	
Ethanol									
1.0	1803.37	1950.24	2261.27	2004.96	0.0215	0.0187	0.0151	0.0184	
1.5	1528.89	1572.53	2133.81	1745.07	0.0173	0.0179	0.0162	0.0172	
2.0	1512.60	1428.21	1390.82	1443.88	0.0166	0.0180	0.0155	0.0167	
Water									
1.0	1835.08	2080.58	1910.27	1941.98	0.0214	0.0187	0.0203	0.0201	
1.5	1551.19	2037.76	1744.59	1777.85	0.0218	0.0165	0.0206	0.0196	

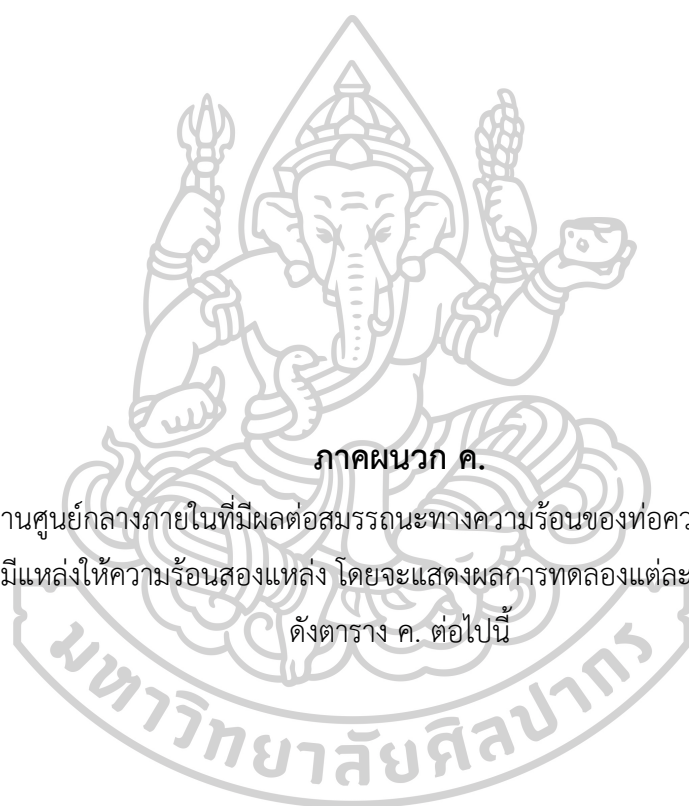
2.0	1547.24	1490.80	1433.11	1490.38		0.0171	0.0194	0.0181	0.0182	
-----	---------	---------	---------	---------	--	--------	--------	--------	--------	--

9. เขียนกราฟความสัมพันธ์โดยให้แกน X เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง ส่วนแกน Y เป็นค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ของชุดทดลองที่มีความยาวส่วนทำระเหย 100 mm และจำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว





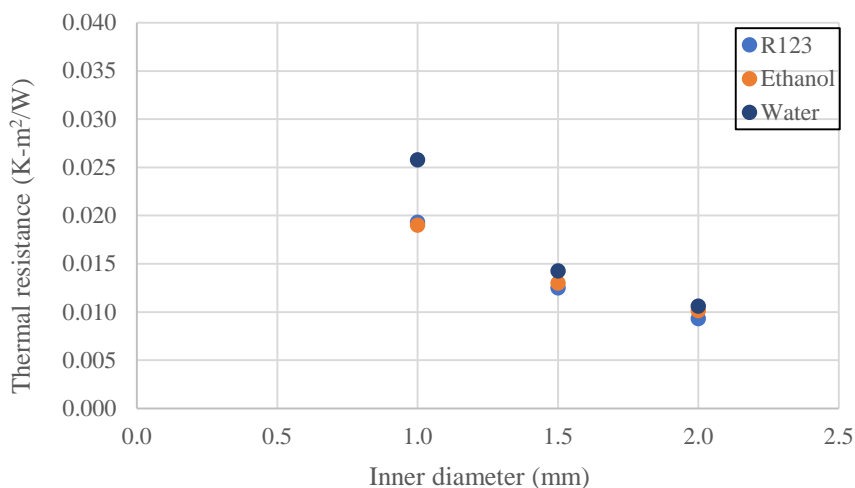
ภาคผนวก ค.

ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

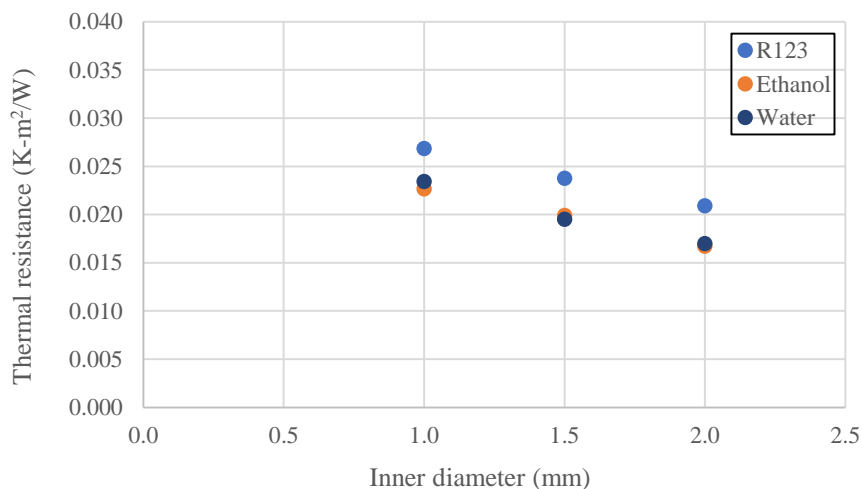
ชนิดมีแหล่งให้ความร้อนสองแหล่ง โดยจะแสดงผลการทดลองแต่ละชุดการทดลอง

ดังตาราง ค. ต่อไปนี้

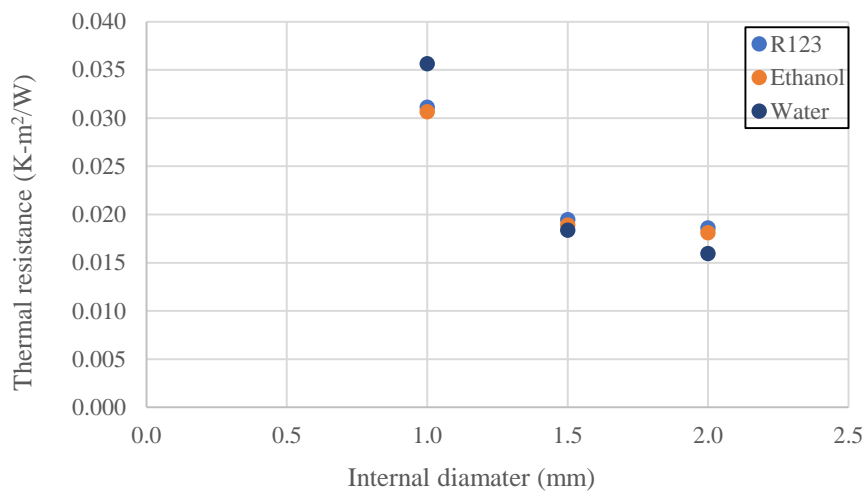
ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสำหรับการวางชุดทดลองในแนวตั้ง



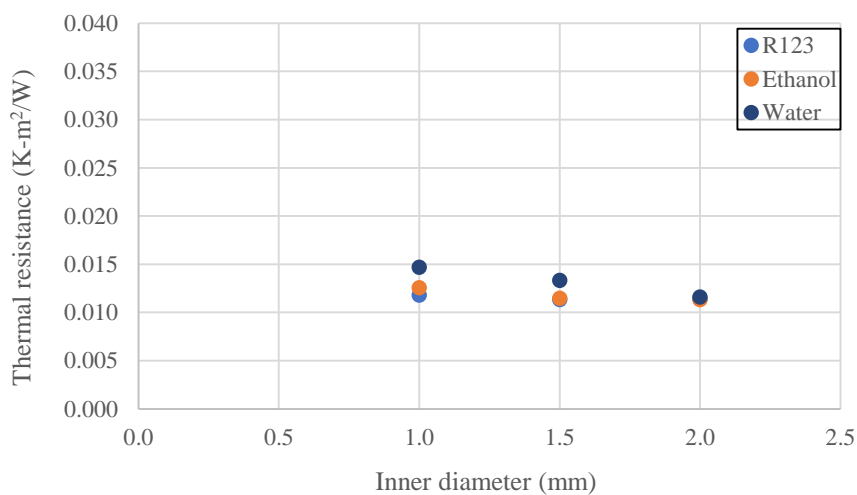
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



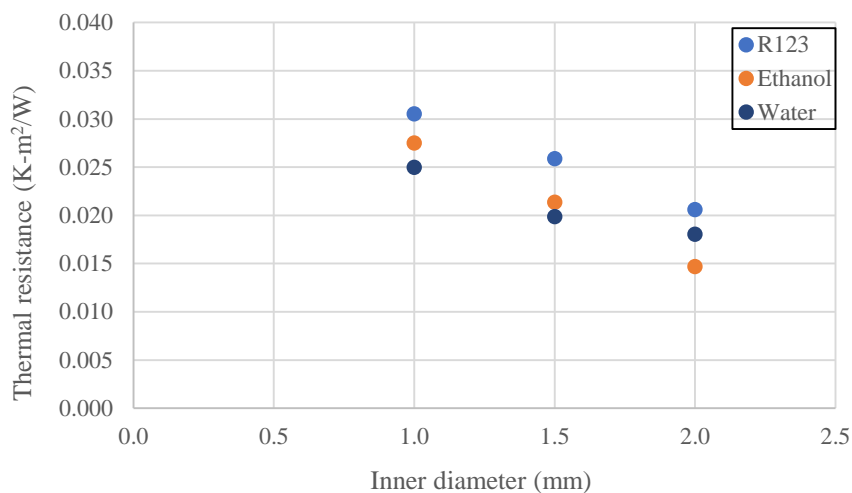
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



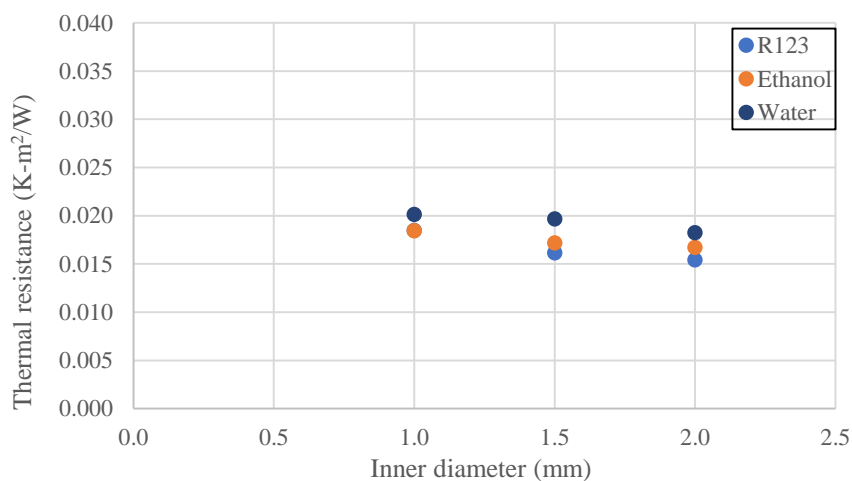
รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



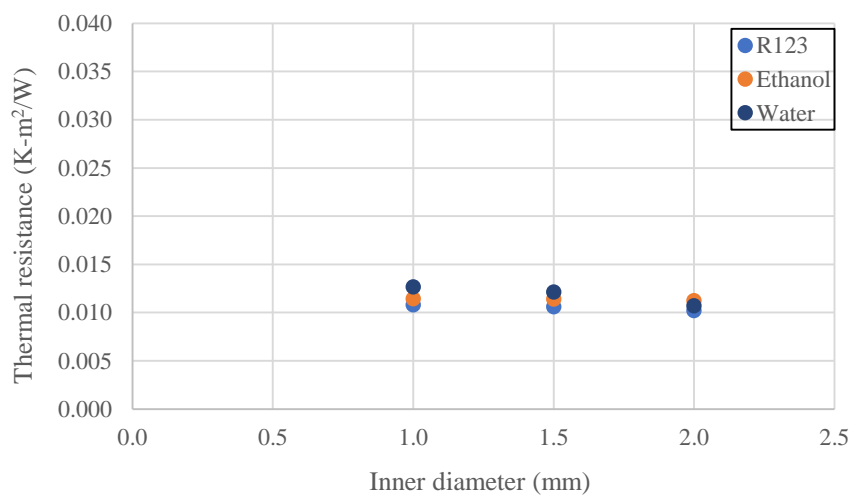
รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



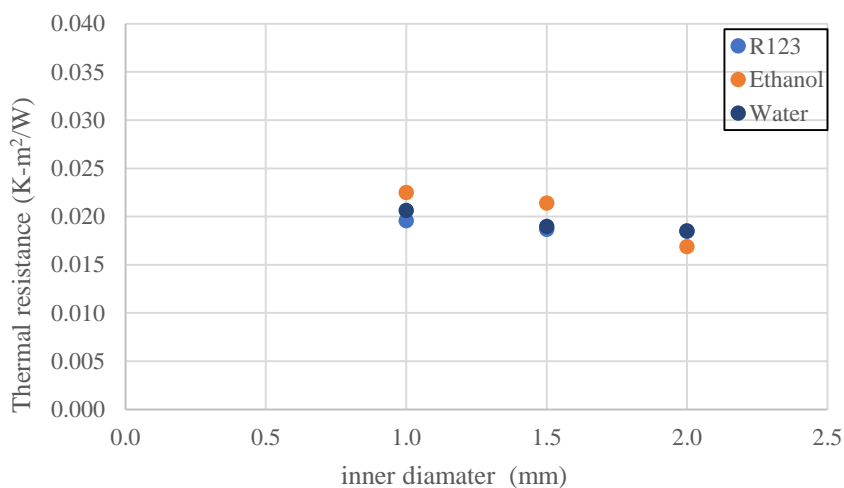
รูปที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนไค้งเลี้ยว 32 ไค้งเลี้ยว



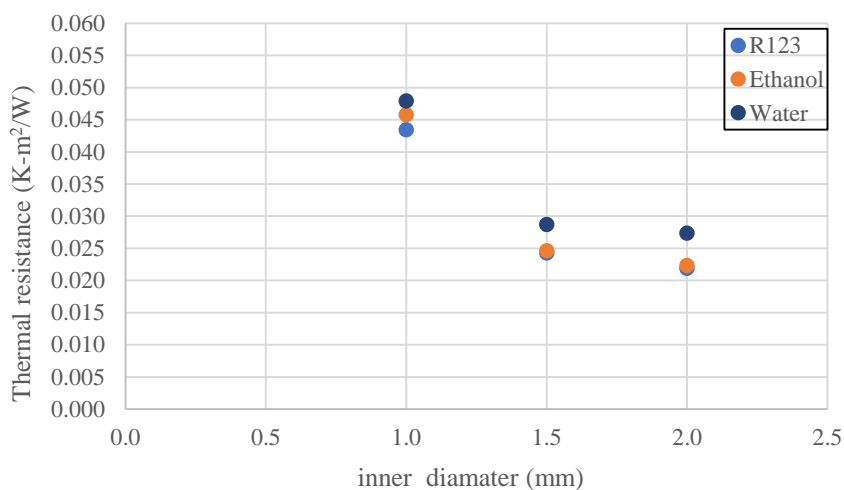
รูปที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนไค้งเลี้ยว 40 ไค้งเลี้ยว



รูปที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว

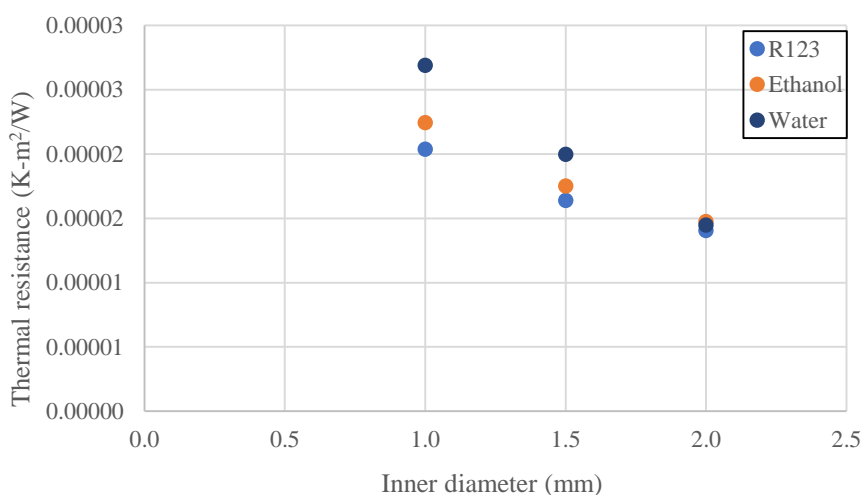


รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว

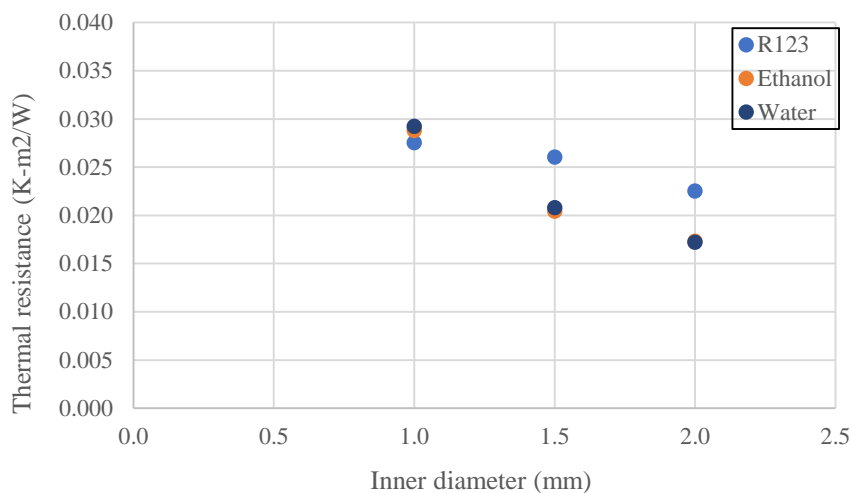


รูปที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

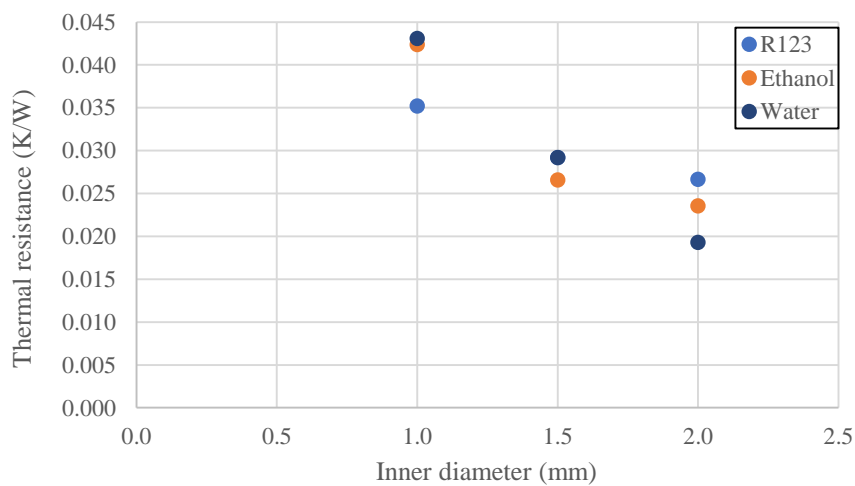
ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสำหรับการวางชุดทดลองใน แนวนอน



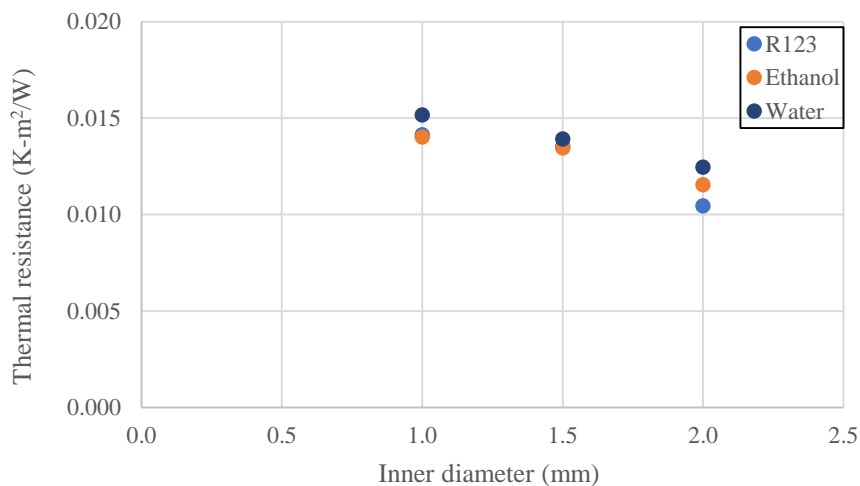
รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



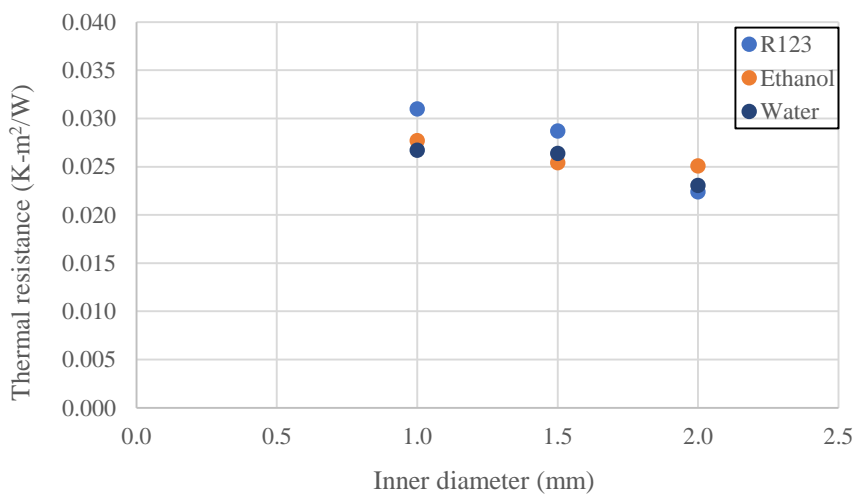
รูปที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



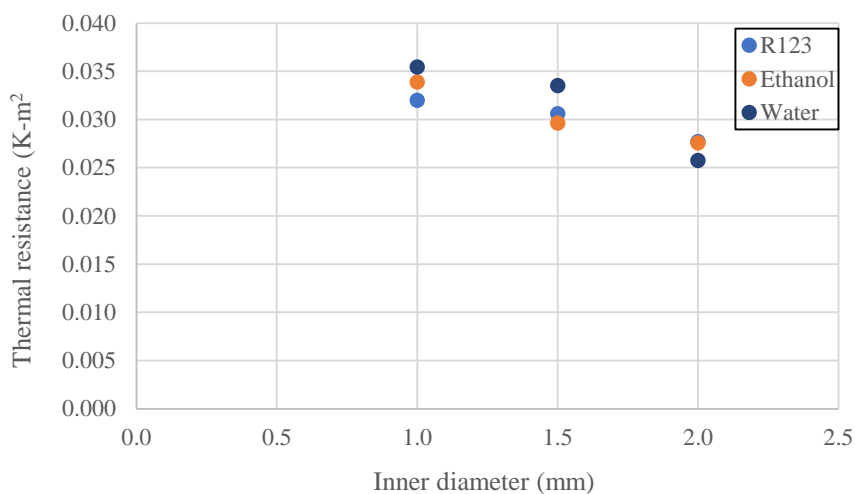
รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



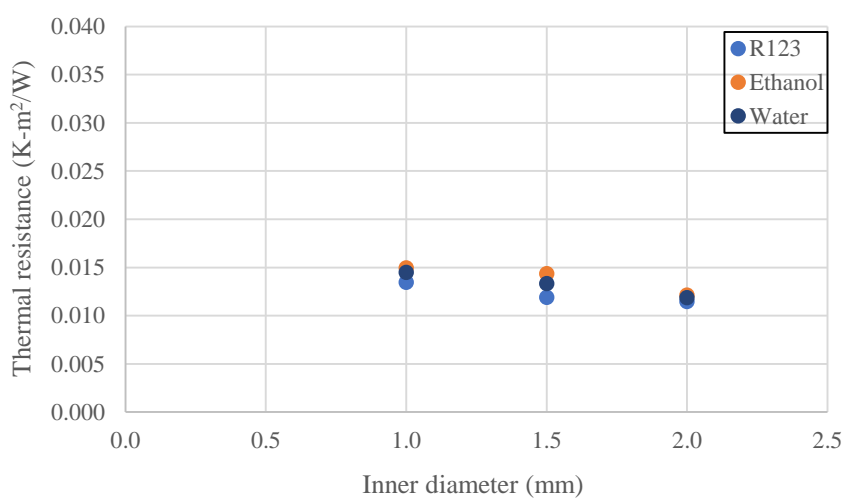
รูปที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



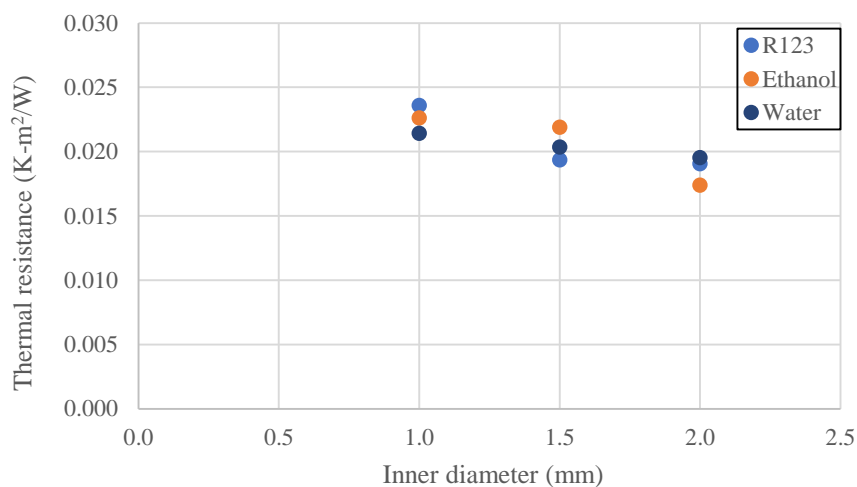
รูปที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



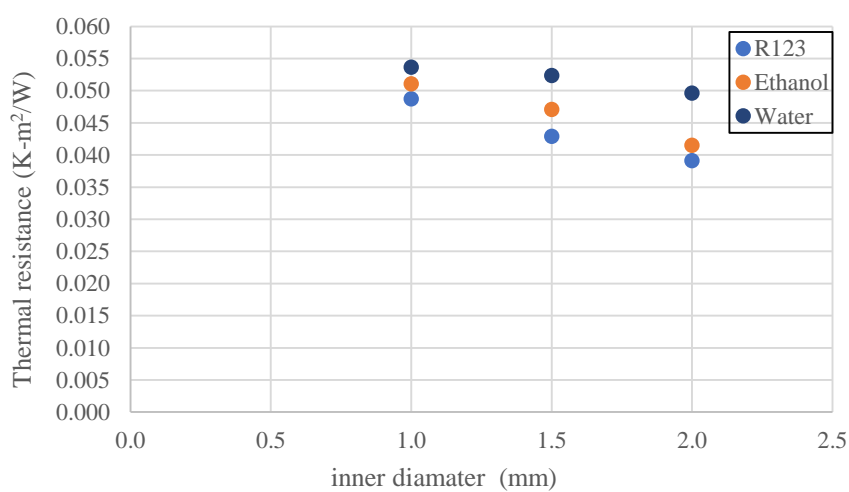
รูปที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 100 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ค.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของชุดทดลองความยาวส่วนทำระเหย 150 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

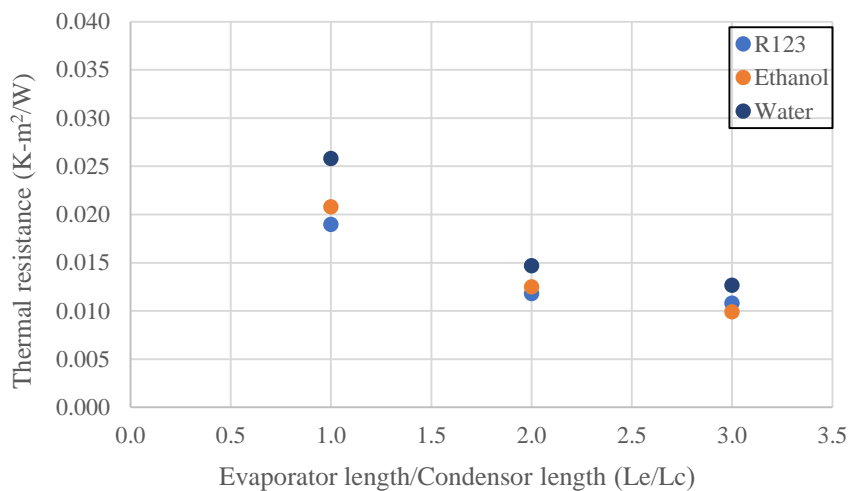


ภาคผนวก ง.

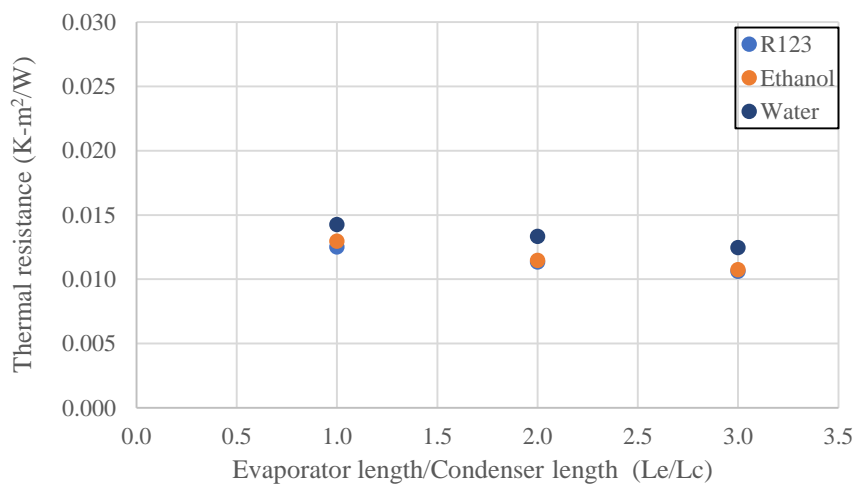
ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มี
แหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยการเปรียบเทียบนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนความยาวส่วนทำระเหย
ต่อส่ความยาวควบคุม (Le/Lc) จะแสดงผลการทดลองแต่ละชุดการทดลอง
ดังตาราง ง. ต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

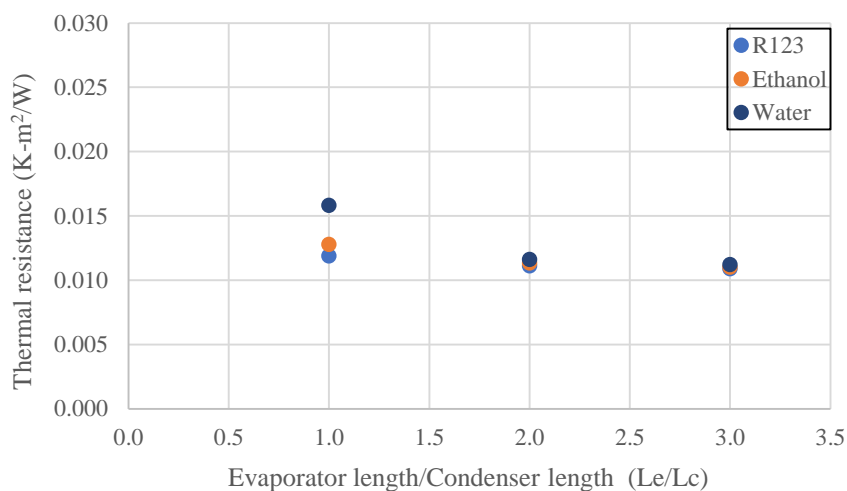
ผลของความยาวส่วนทำระเหยสำหรับการวางชุดทดลองใน แนวตั้ง



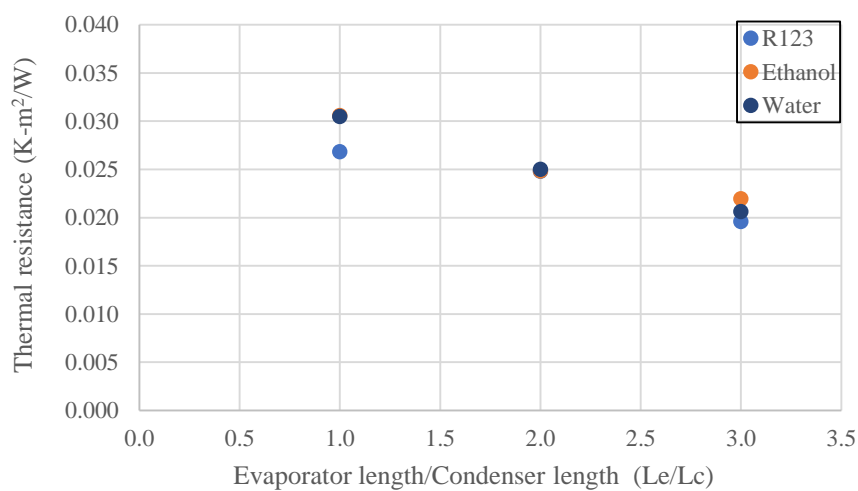
รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



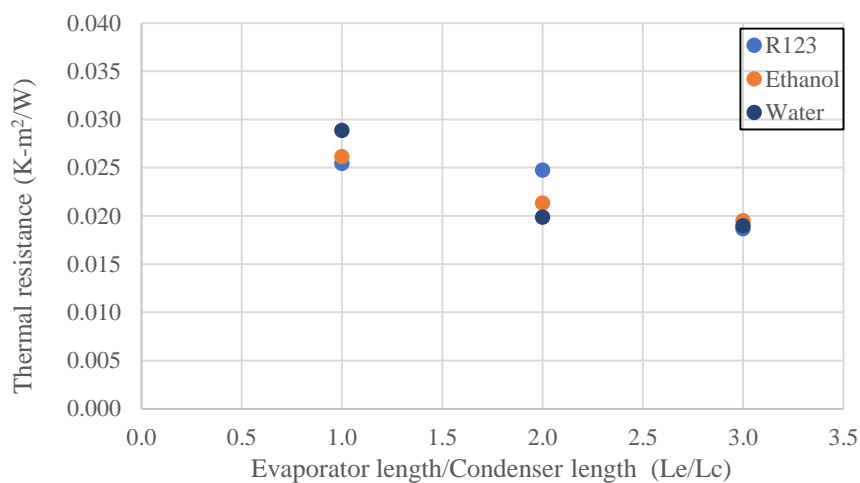
รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



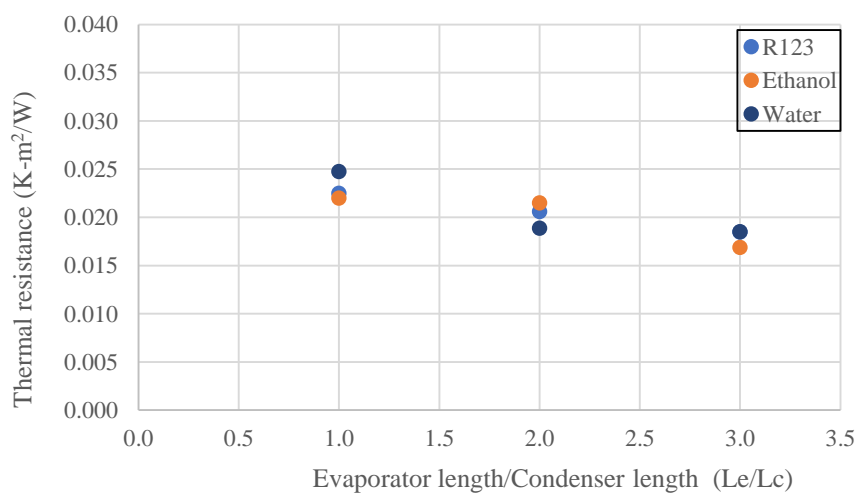
รูปที่ ๓.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



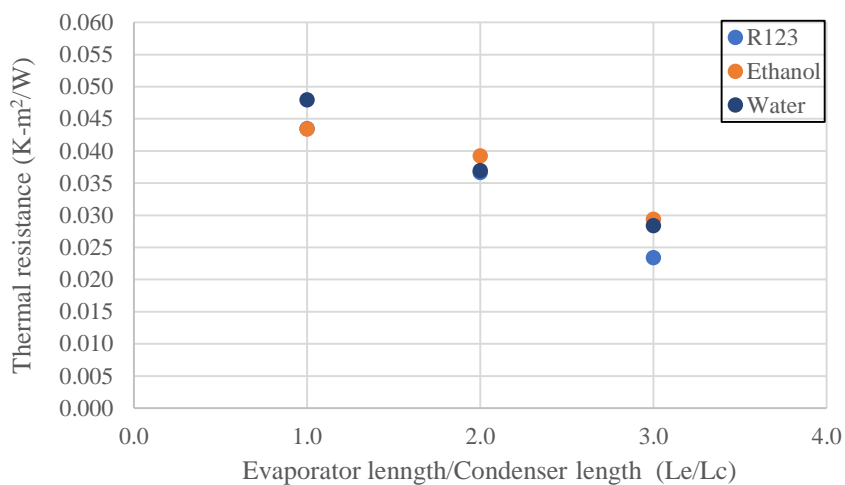
รูปที่ ๓.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



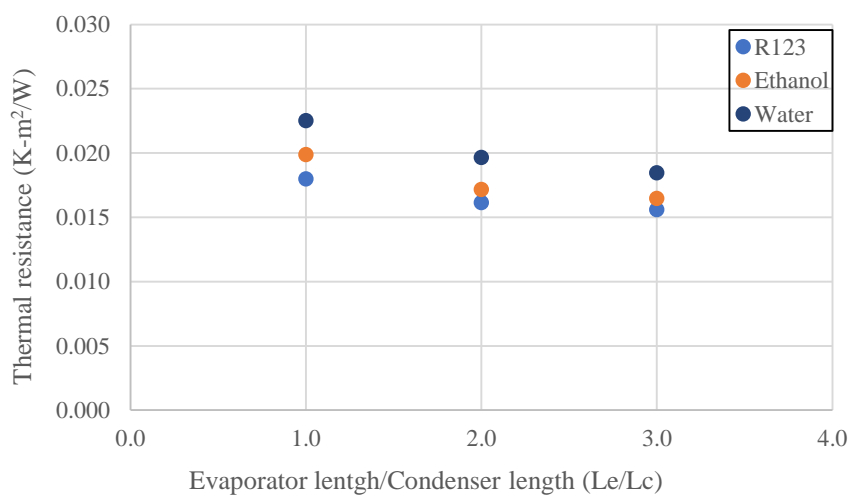
รูปที่ ๓.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



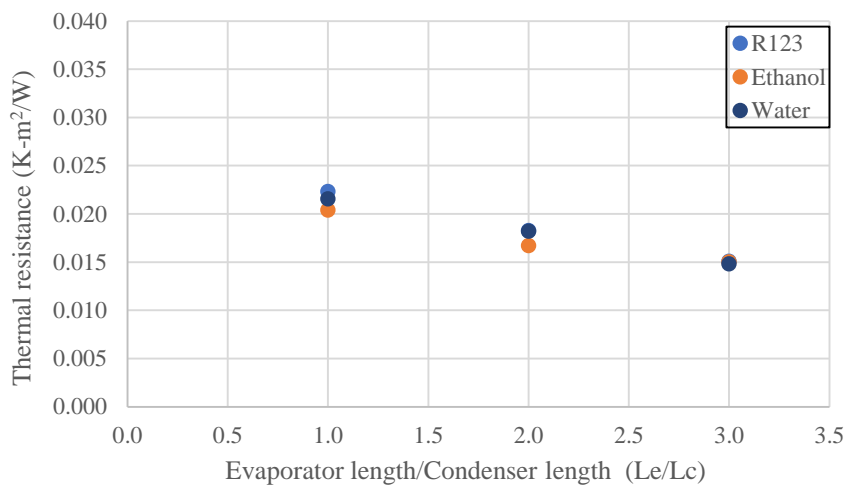
รูปที่ ๓.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ๗.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

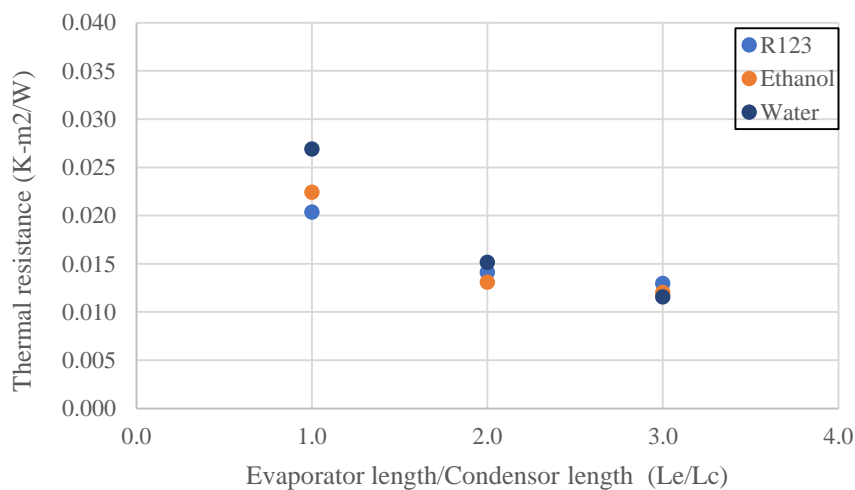


รูปที่ ๗.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

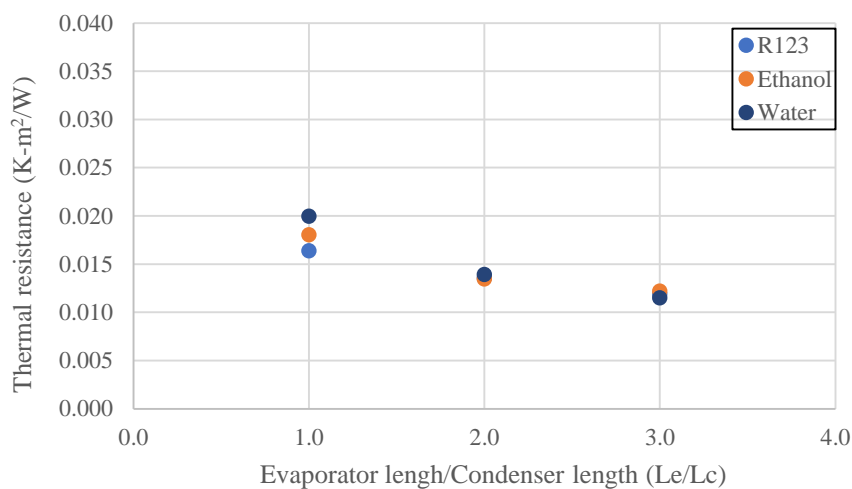


รูปที่ ง.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้ผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว

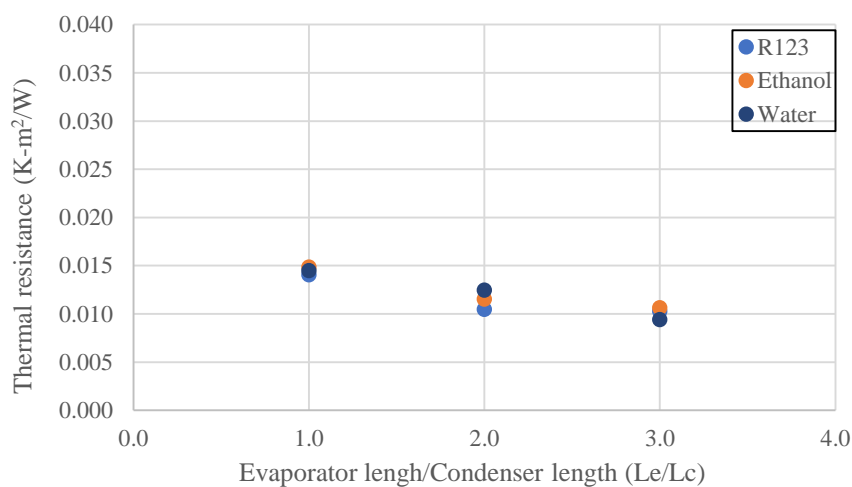
ผลของความยาวส่วนทำระเหยสำหรับการวางชุดทดลองใน แนวนอน



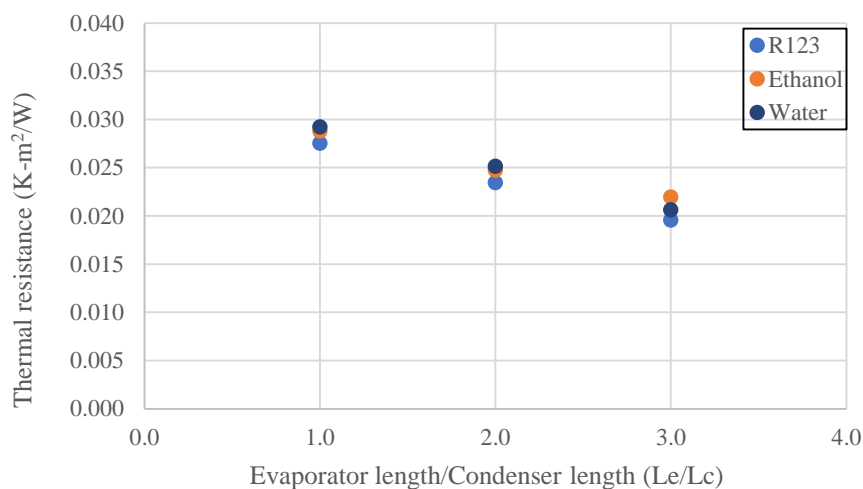
รูปที่ ง.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้ผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



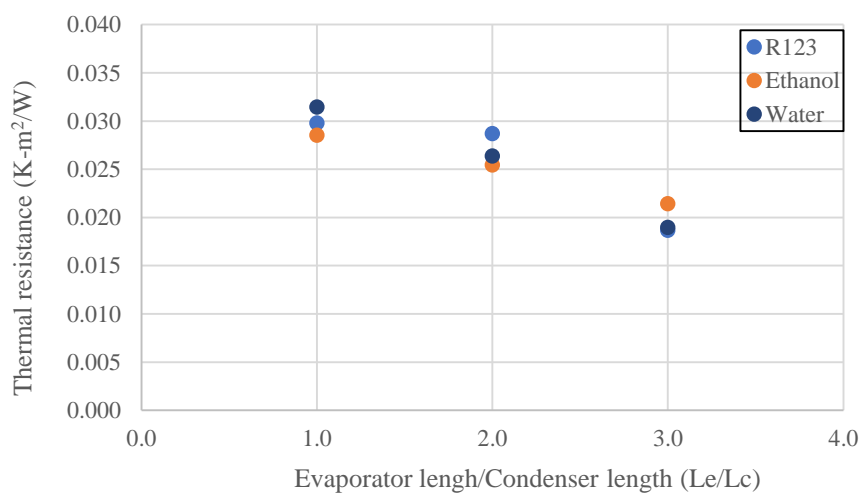
รูปที่ ง.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



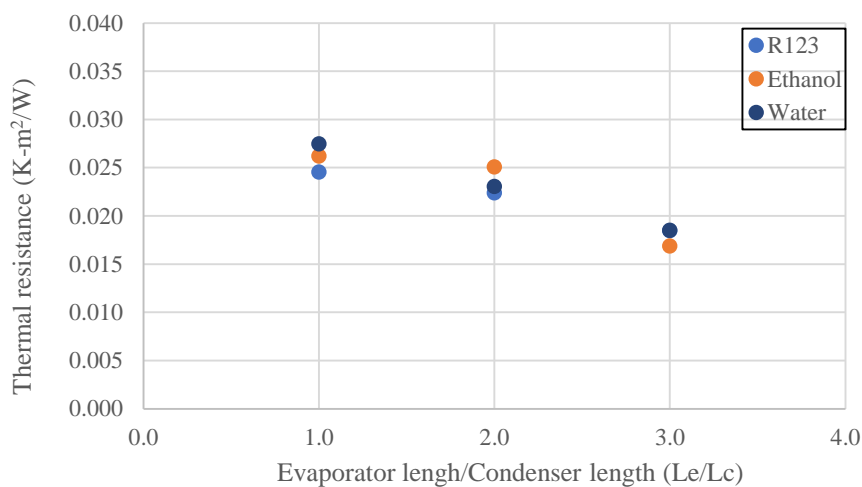
รูปที่ ง.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว



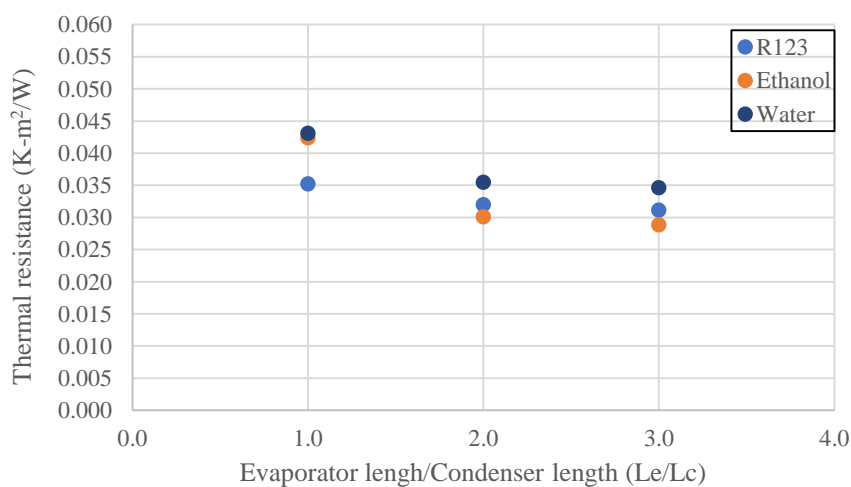
รูปที่ ง.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



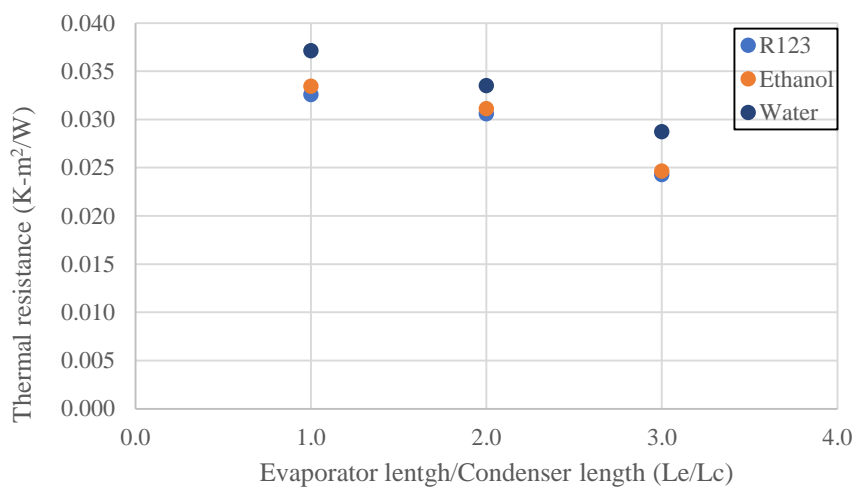
รูปที่ ง.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm
จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



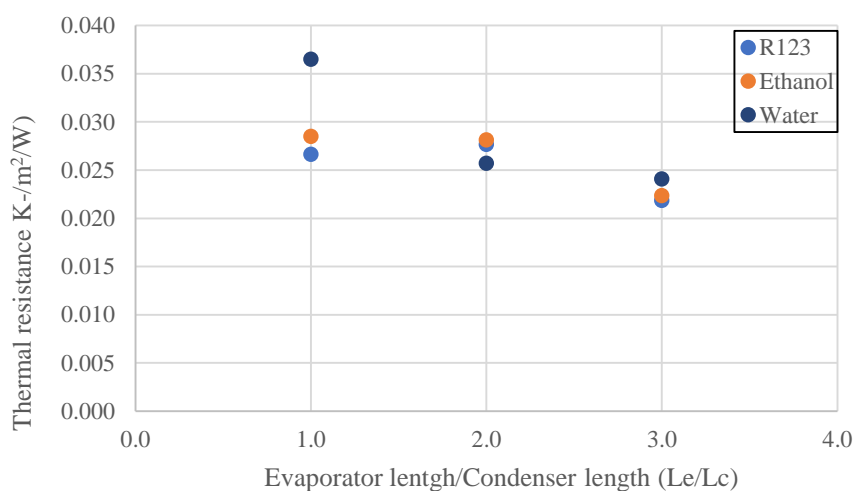
รูปที่ ง.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ง.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



รูปที่ ง.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



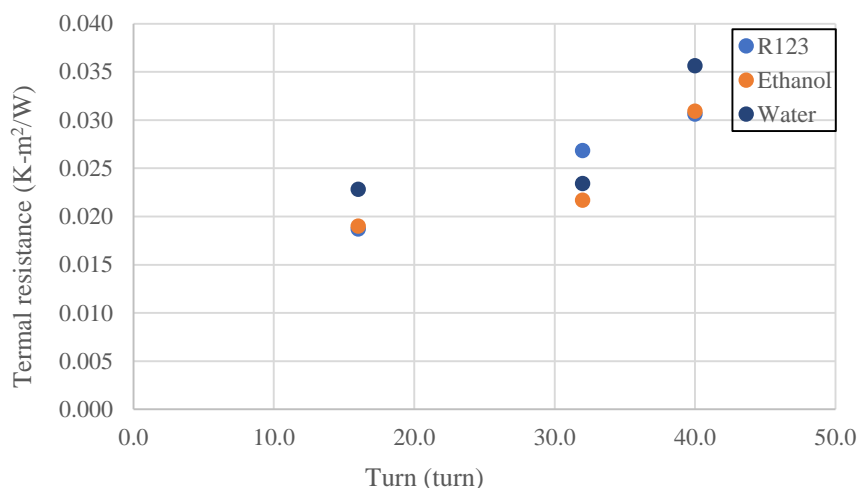
รูปที่ ง.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความยาวส่วนทำระเหยต่อความยาวส่วนควบแน่นกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว



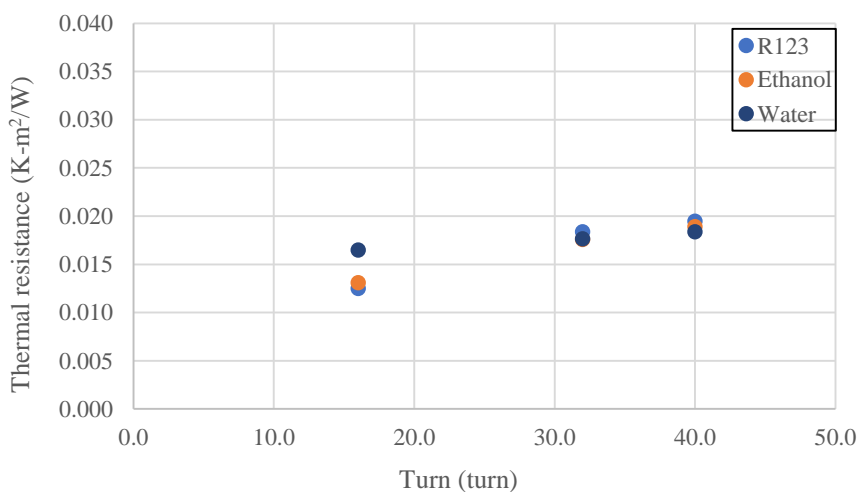
ภาคผนวก จ

ผลของจำนวนโค้งเดี่ยวที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบชนิดมีแหล่งให้ความร้อนสองแหล่ง โดยจะแสดงผลการทดลองแต่ละชุดการทดลอง
ดังตาราง จ. ต่อไปนี้

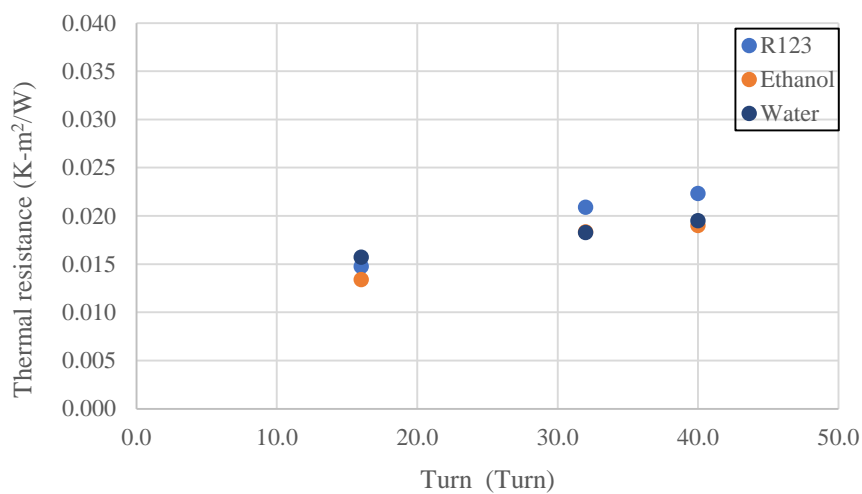
ผลของจำนวนโค้งเฉลี่ยสำหรับการวางชุดทดลองในแนวตั้ง



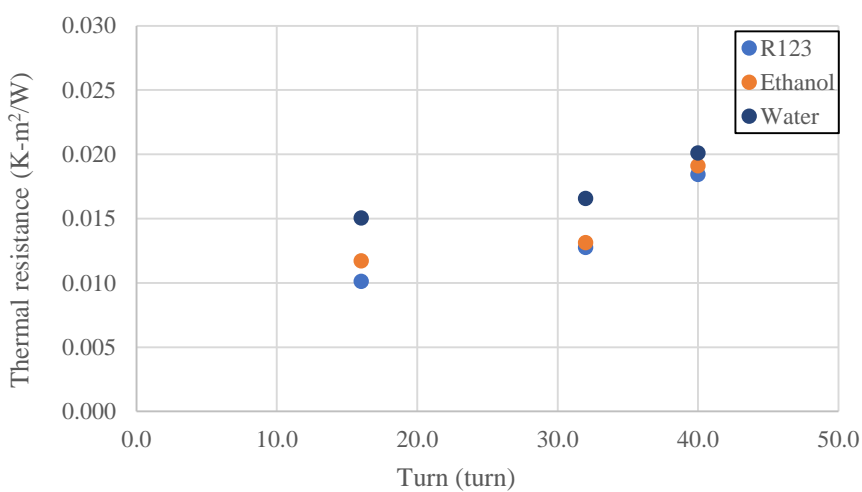
รูปที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm



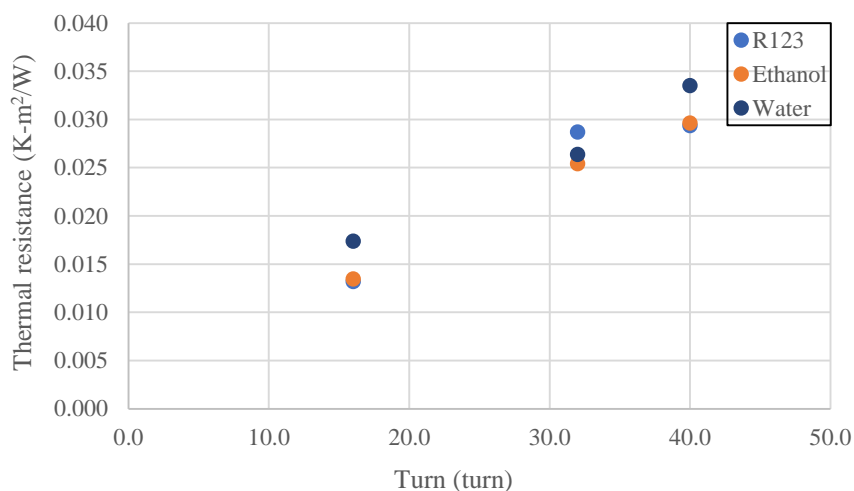
รูปที่ จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm



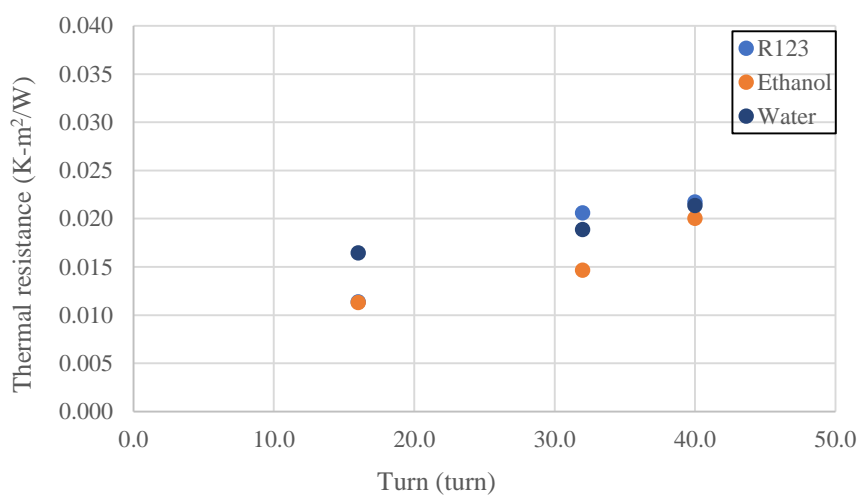
รูปที่ จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm



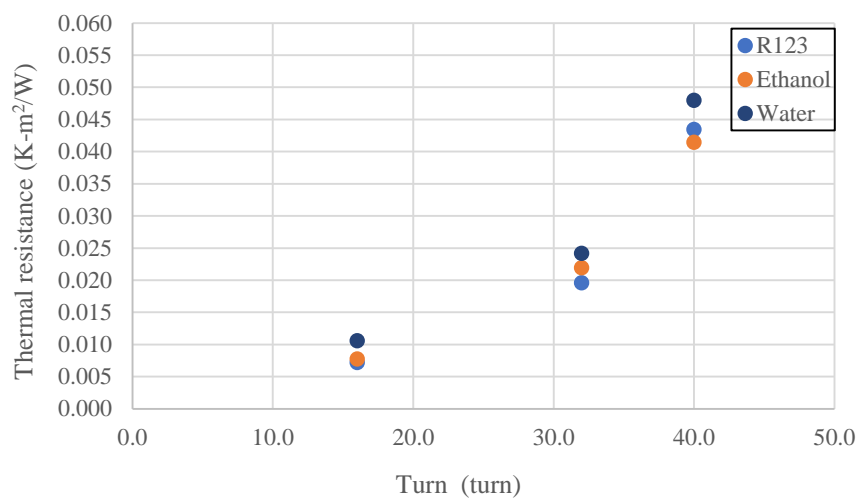
รูปที่ จ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm



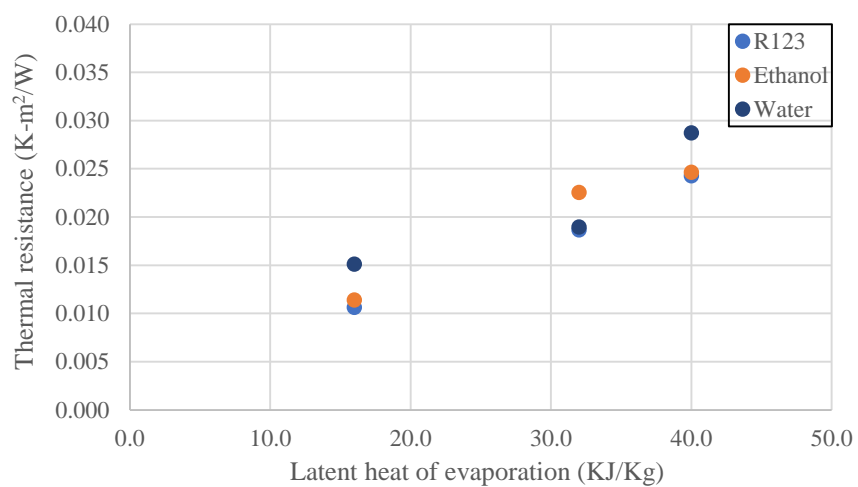
รูปที่ จ.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm



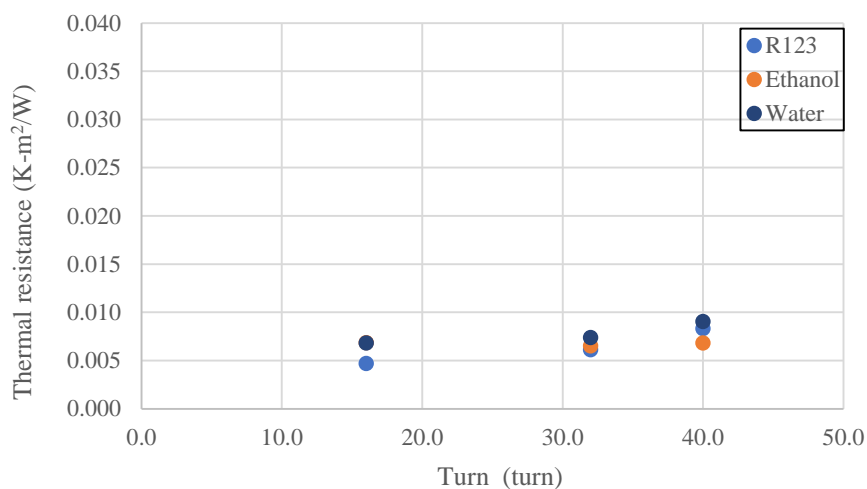
รูปที่ จ.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm



รูปที่ จ.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm

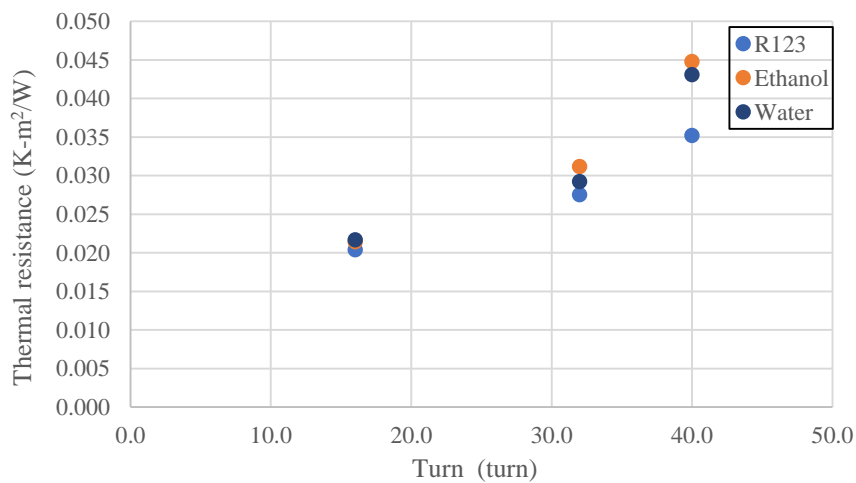


รูปที่ จ.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm

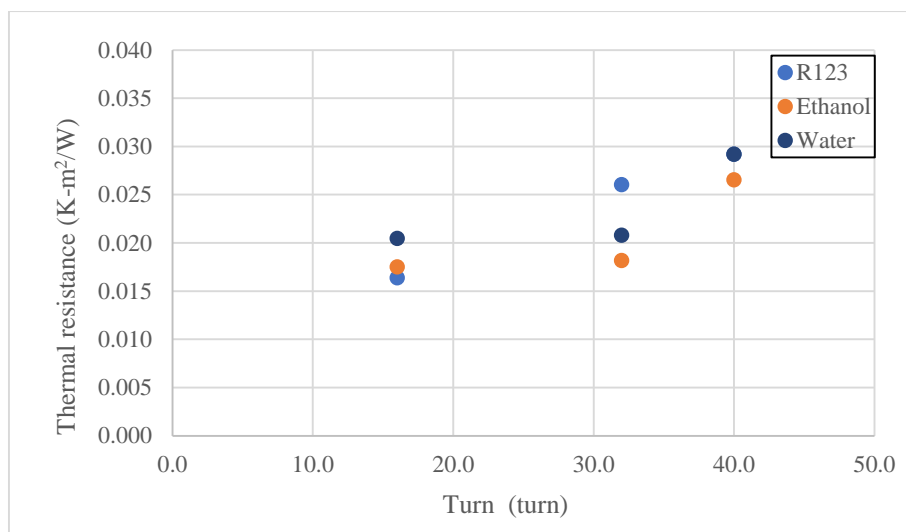


รูปที่ จ.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm

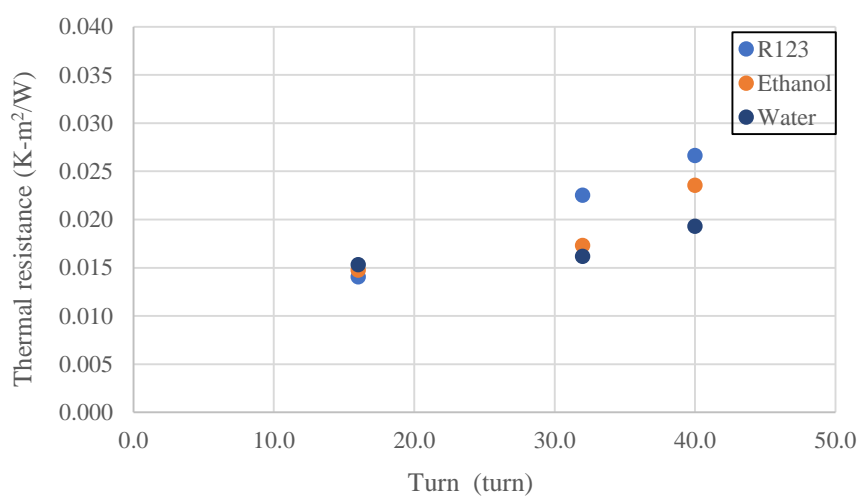
ผลของจำนวนโค้งสำหรับการวางชุดทดลองใน แนวนอน



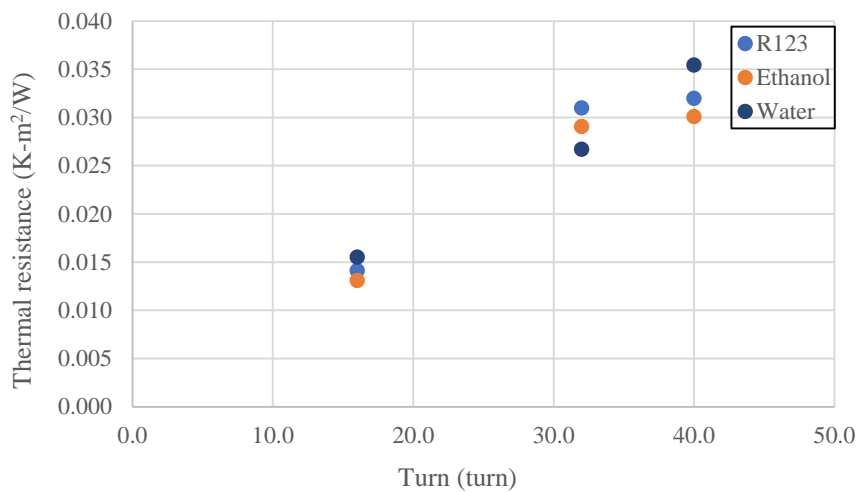
รูปที่ จ.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm



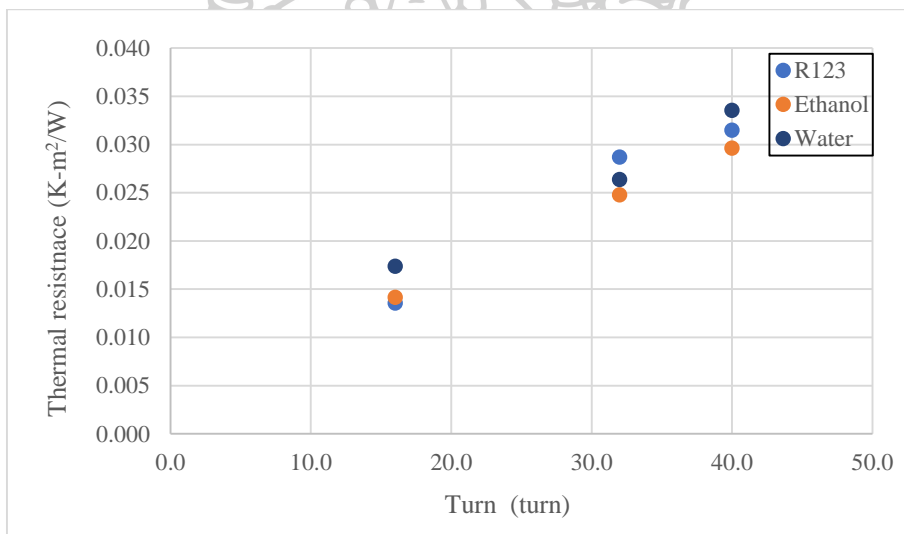
รูปที่ จ.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm



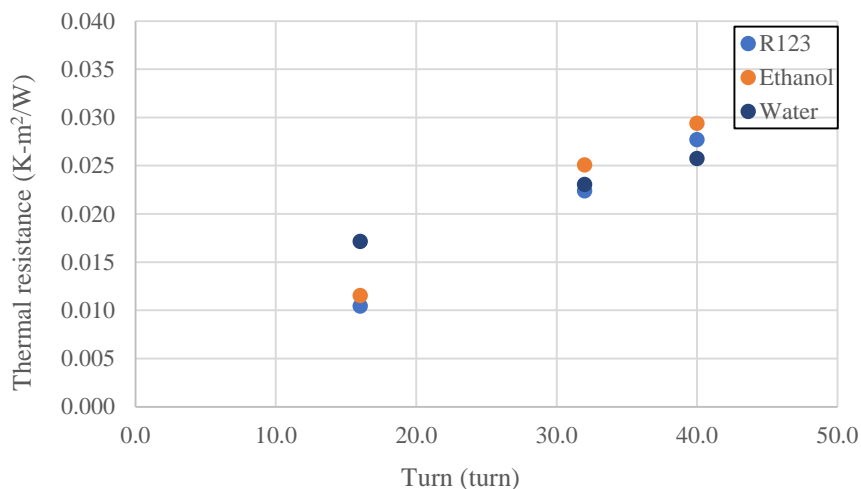
รูปที่ จ.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความยาวส่วนทำระเหย 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm



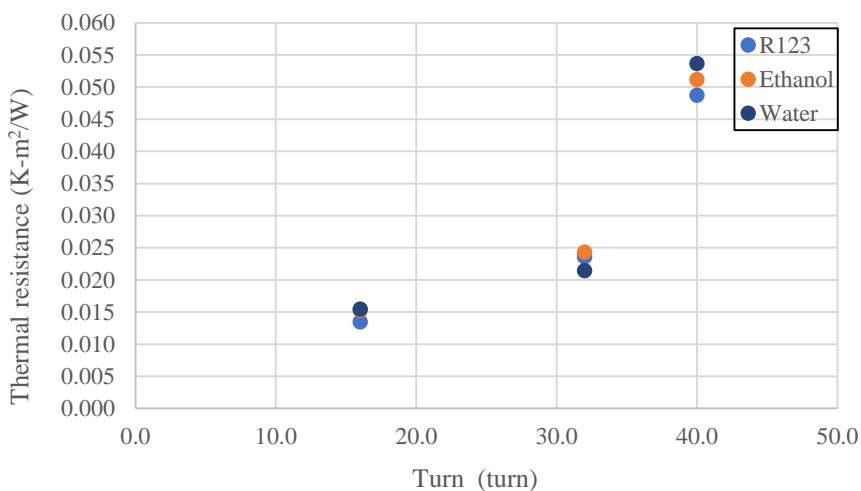
รูปที่ จ.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm



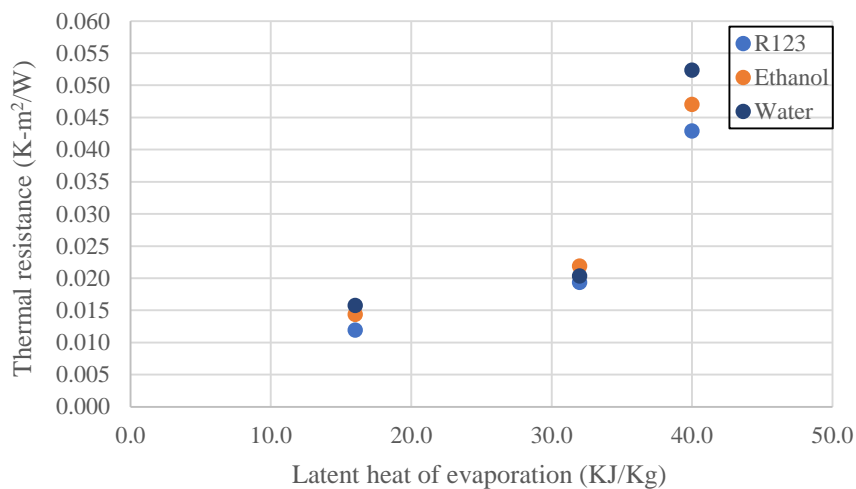
รูปที่ จ.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm



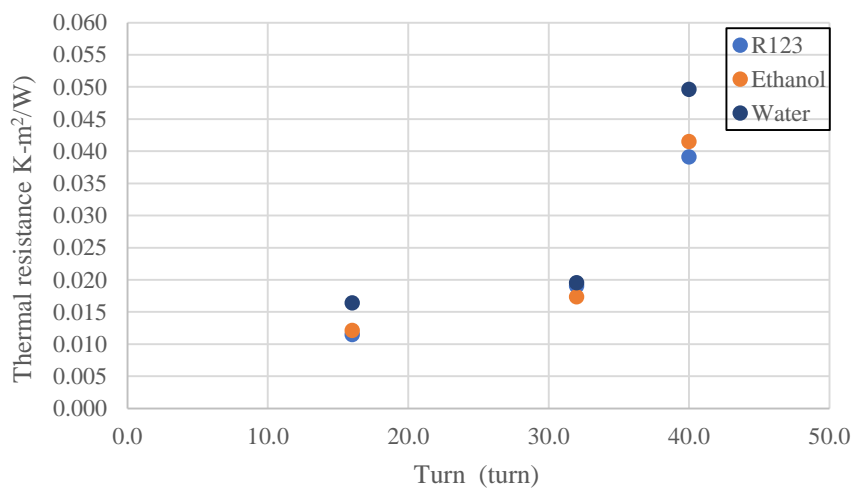
รูปที่ จ.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm



รูปที่ จ.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเกี่ยวกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm



รูปที่ จ.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm

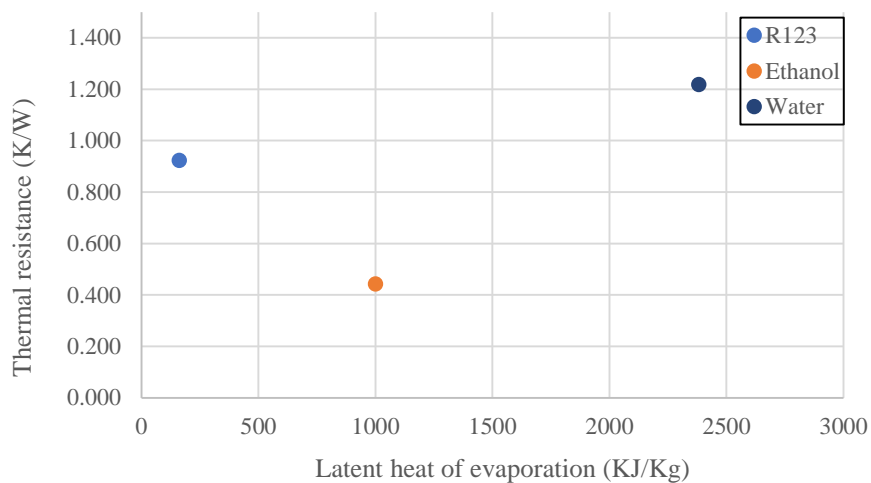


รูปที่ จ.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยกับค่าความต้านทานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm

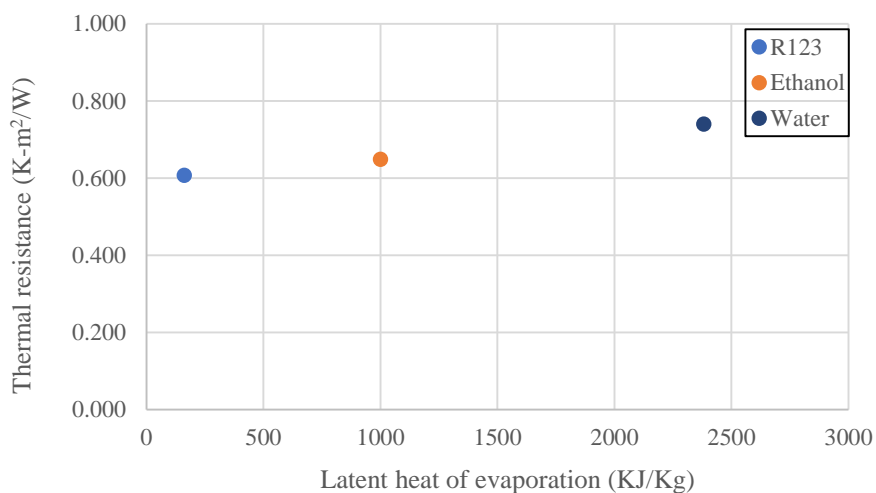
ภาคผนวก ฉ

ผลของสารทำงานที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีแหล่ง
รับความร้อนสองแหล่ง โดยแต่ละรูปแสดงความสัมพันธ์ของความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่า
ความต้านทานความร้อน ทั้งการวางชุดทดลองในแนวนอนและแนวตั้ง

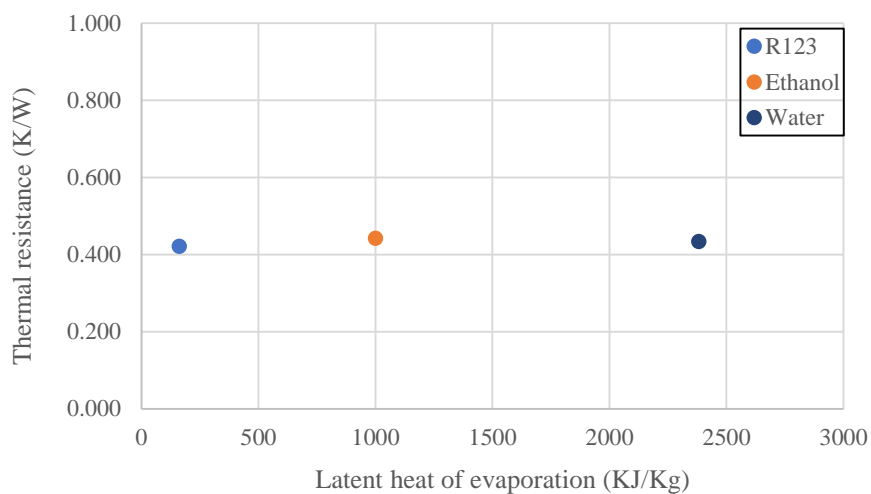




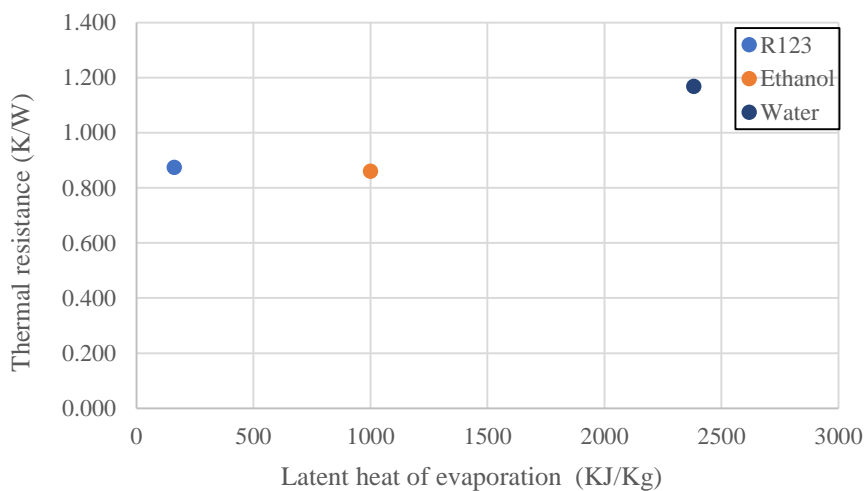
รูปที่ ๑.1 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



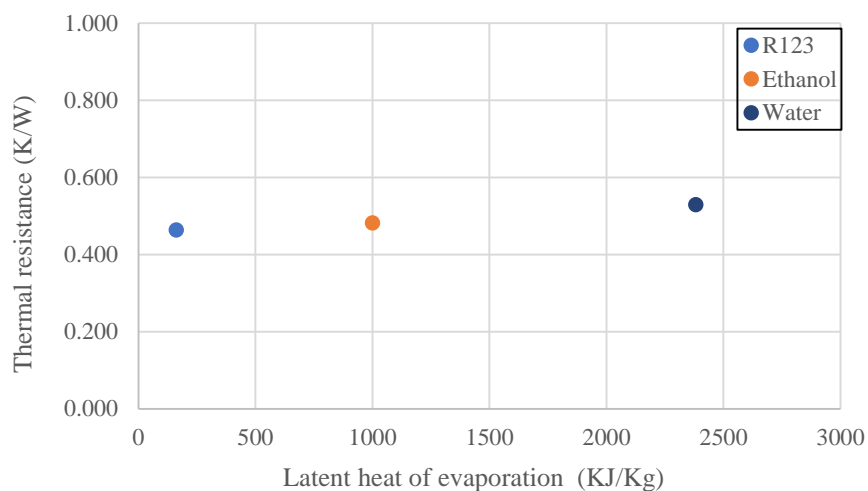
รูปที่ ๑.2 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



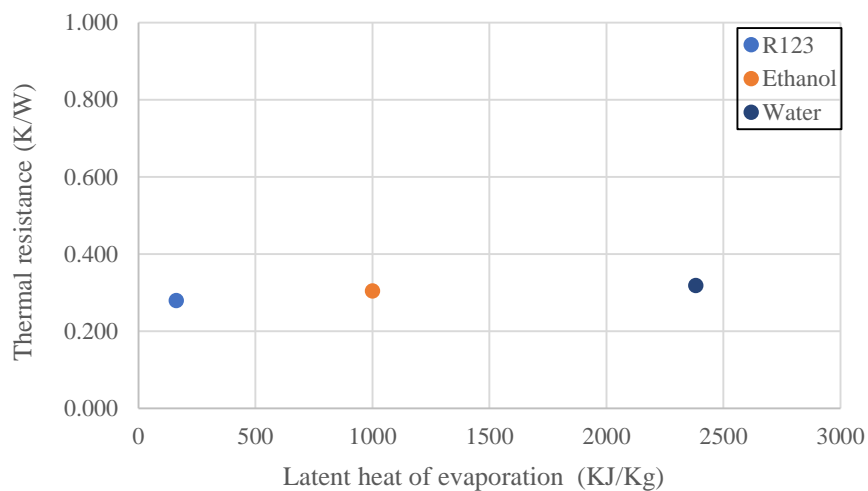
รูปที่ ๓.3 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



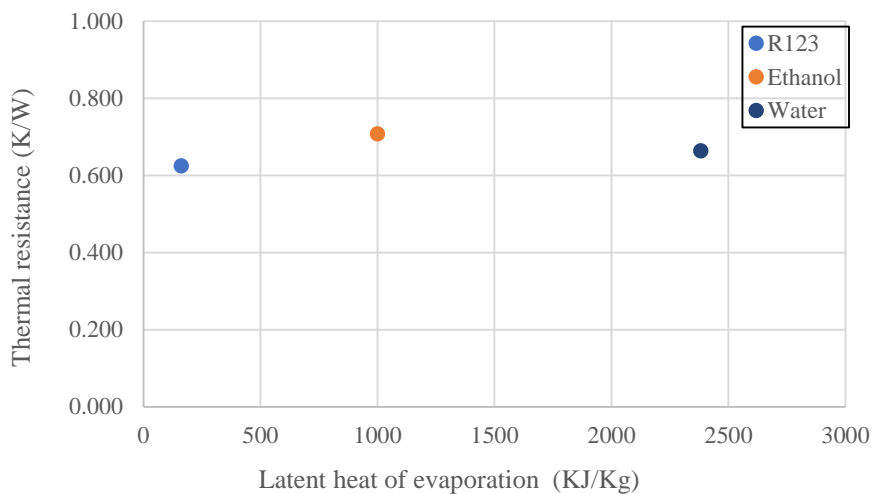
รูปที่ ๓.4 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



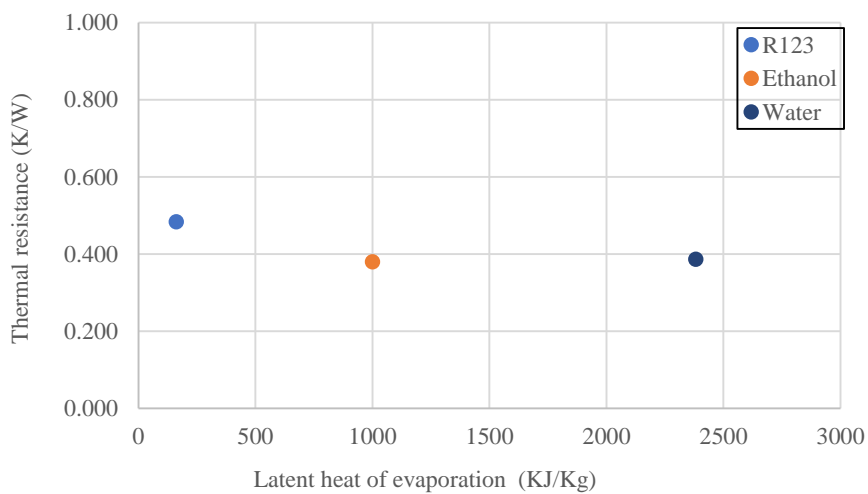
รูปที่ ๕.5 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



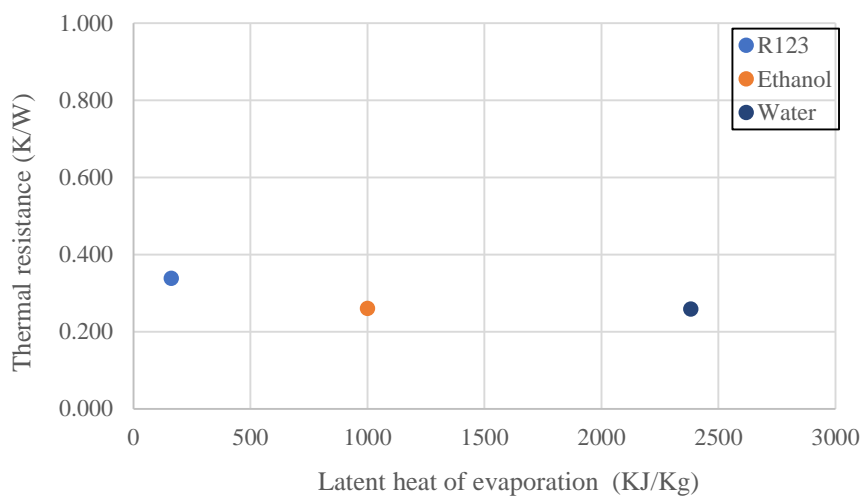
รูปที่ ๕.6 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



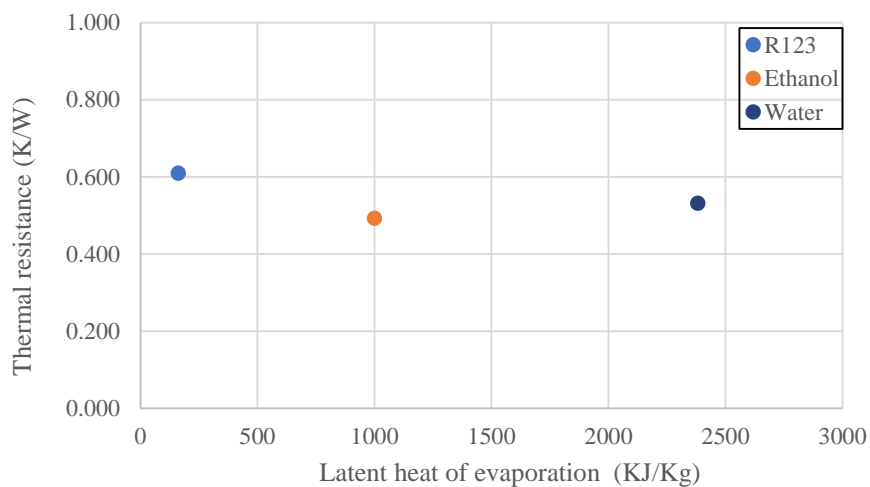
รูปที่ ๗.7 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



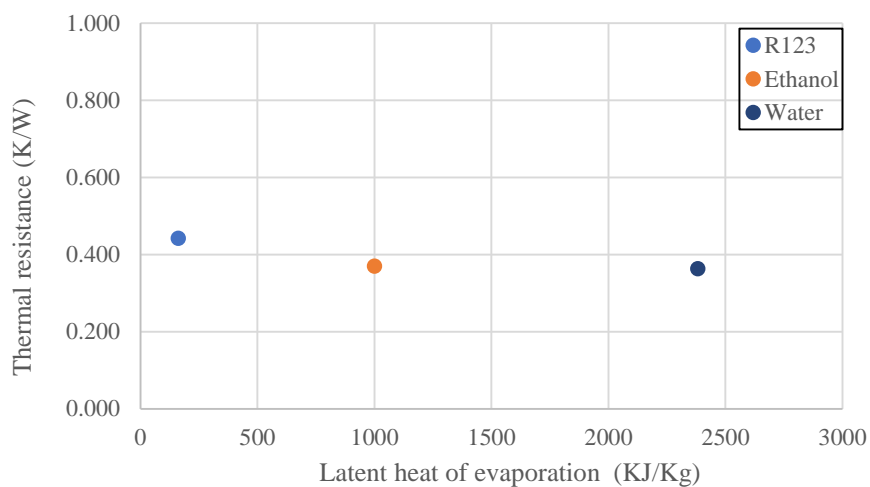
รูปที่ ๗.8 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



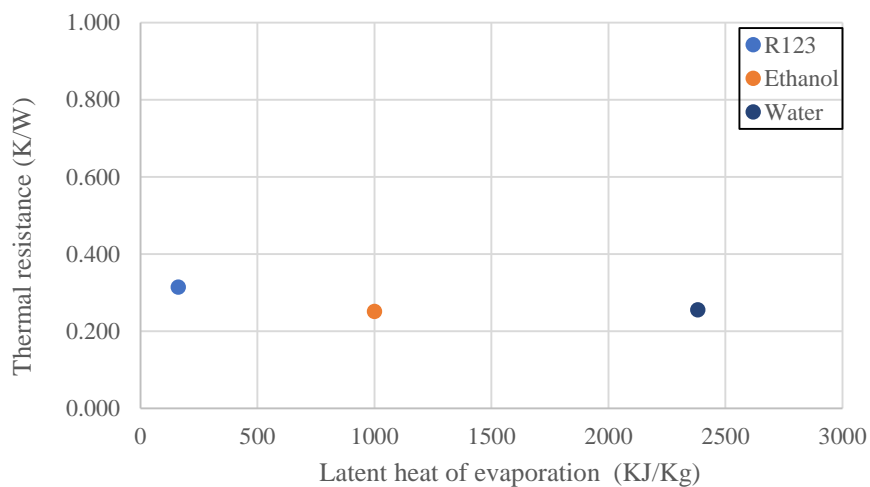
รูปที่ ๙.9 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



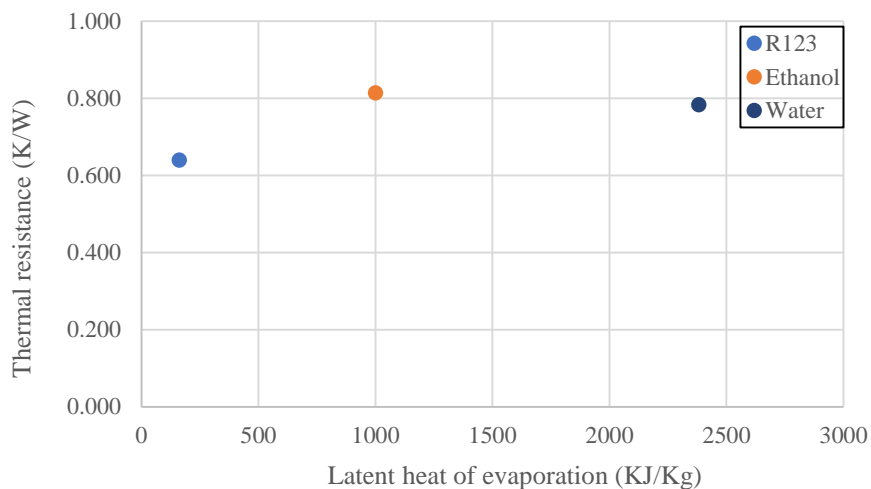
รูปที่ ๙.10 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



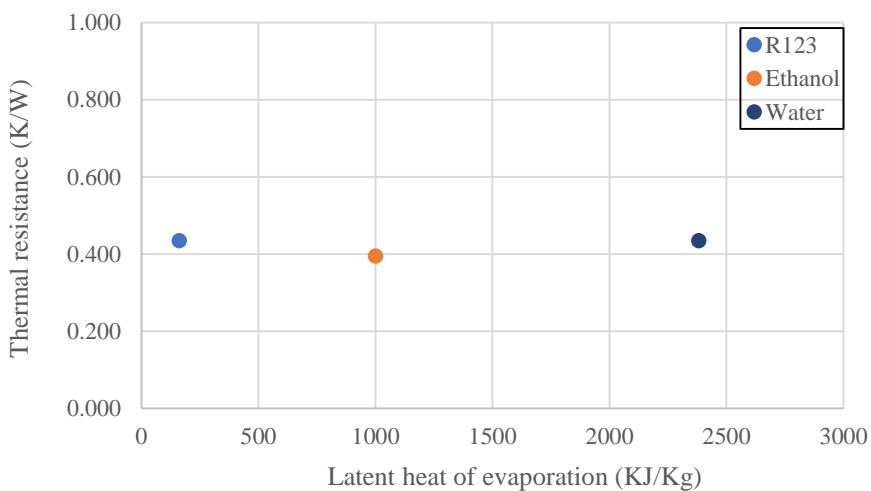
รูปที่ ๑.11 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



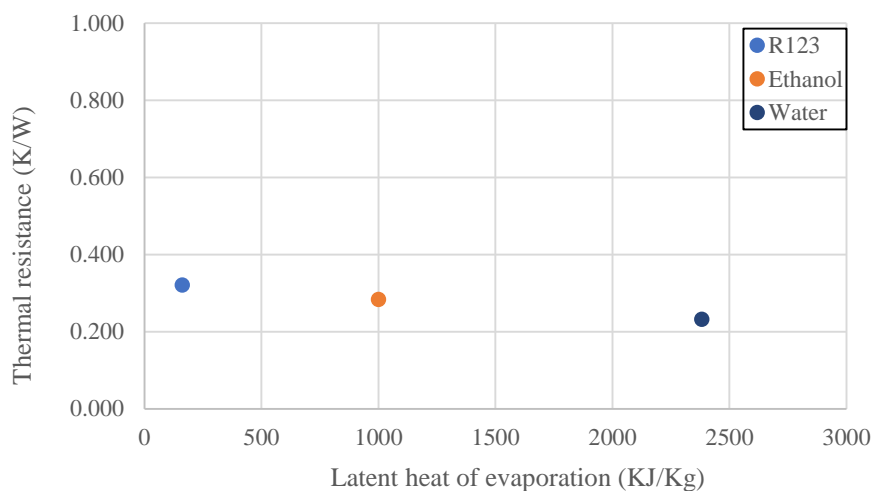
รูปที่ ๑.12 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



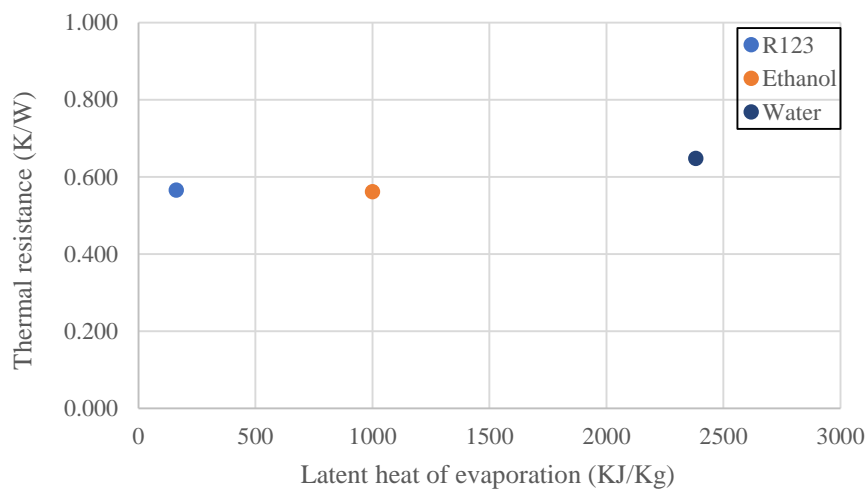
รูปที่ ๑.13 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



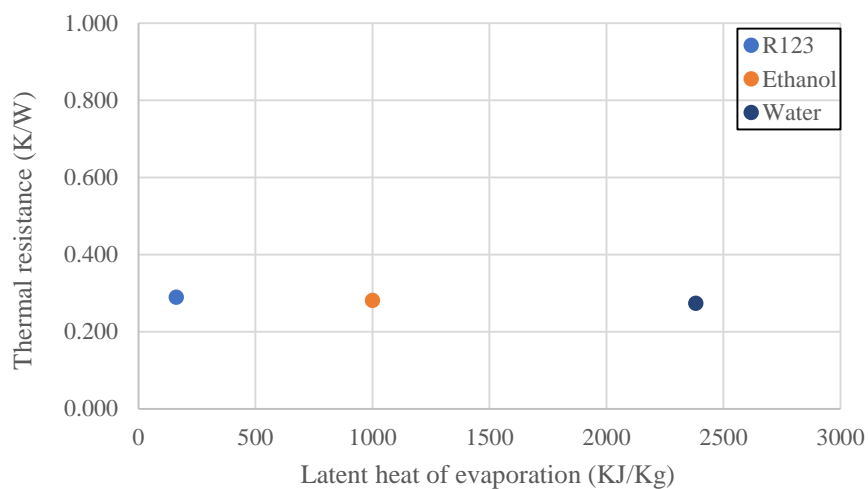
รูปที่ ๑.14 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



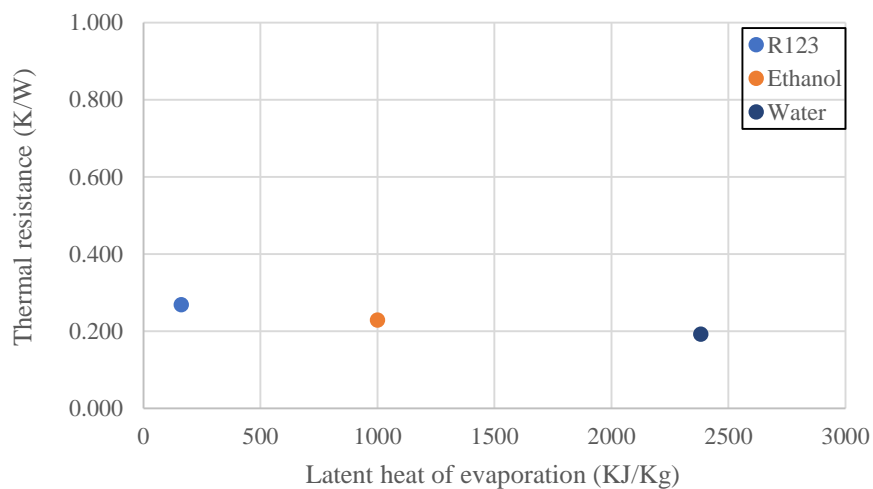
รูปที่ ๑.15 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



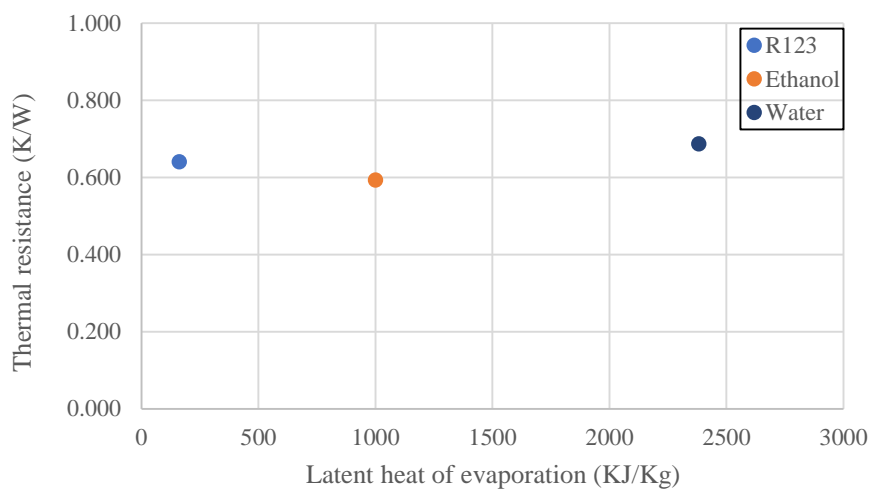
รูปที่ ๑.16 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



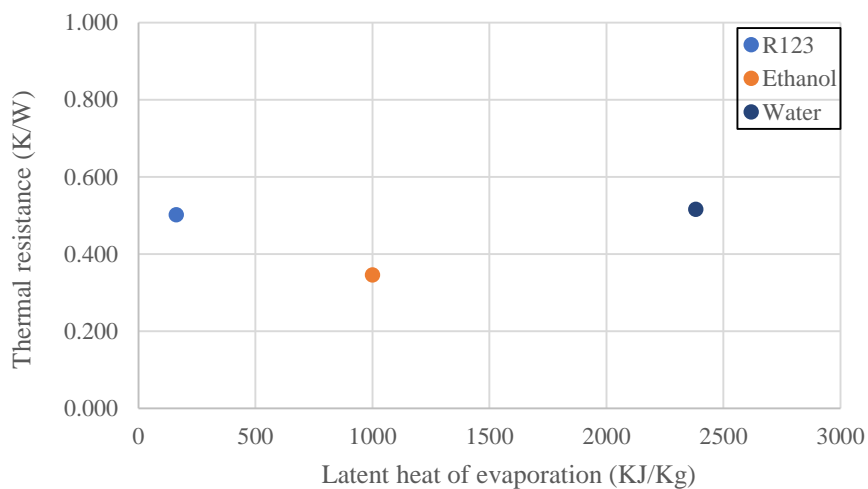
รูปที่ ๑.17 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



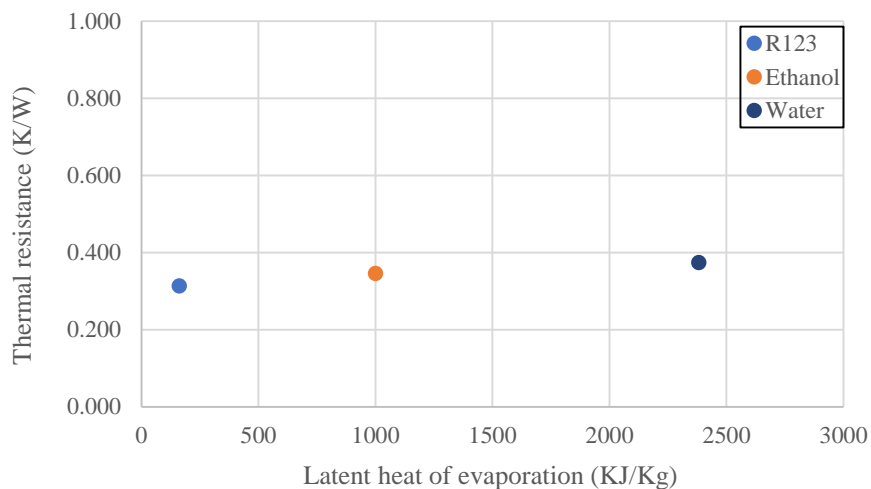
รูปที่ ๑.18 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



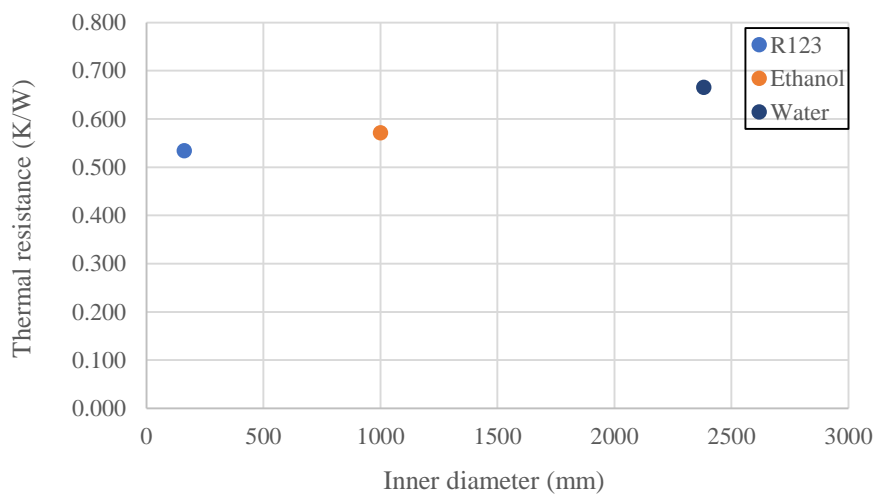
รูปที่ ๑.19 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 100 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



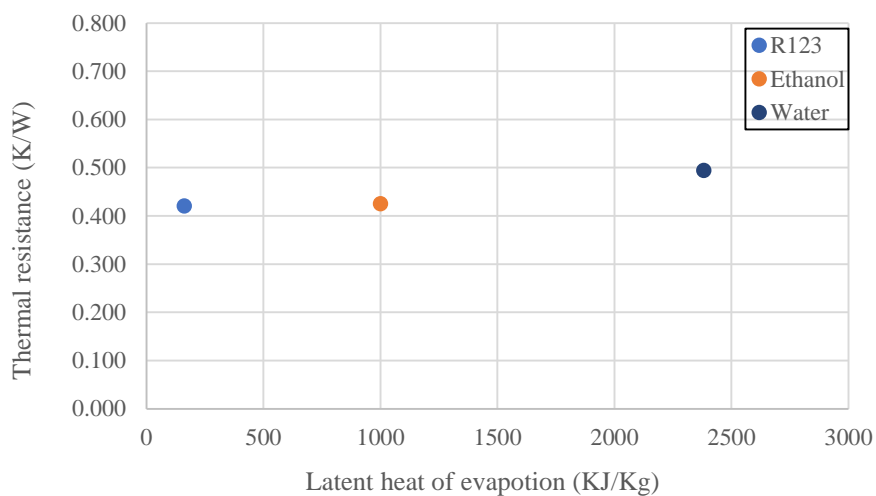
รูปที่ ๑.20 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 100 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



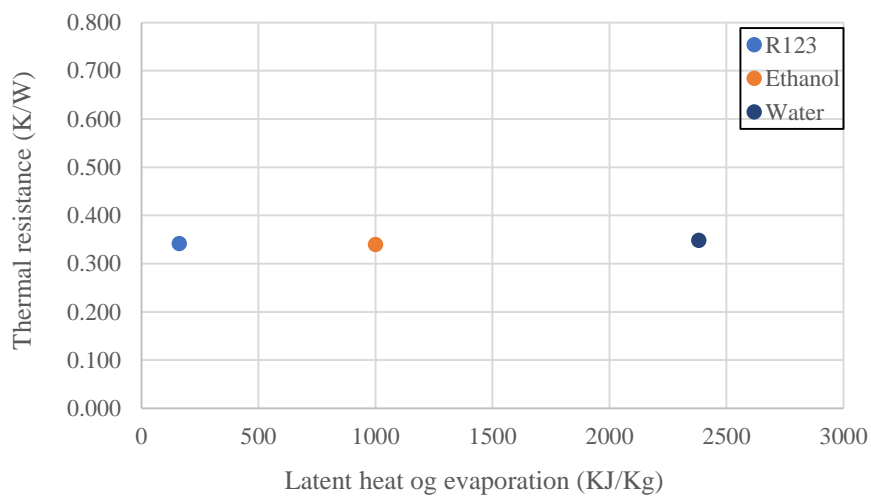
รูปที่ ๑.21 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



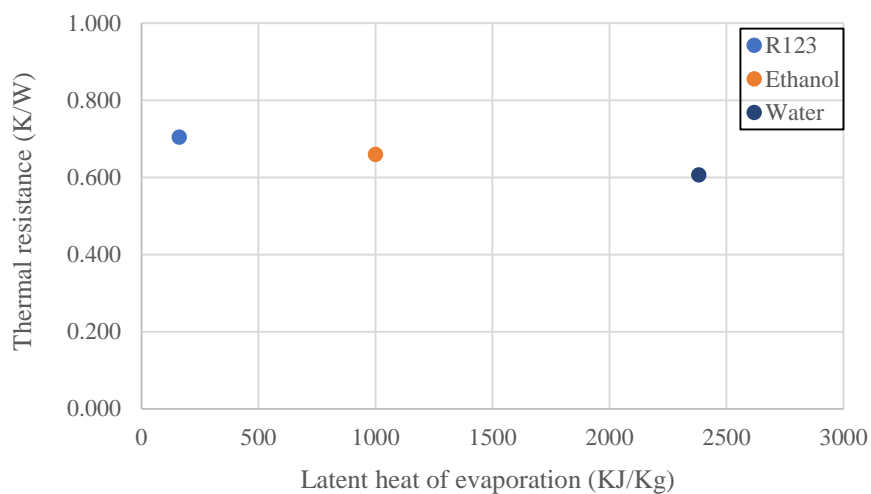
รูปที่ ๑.22 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



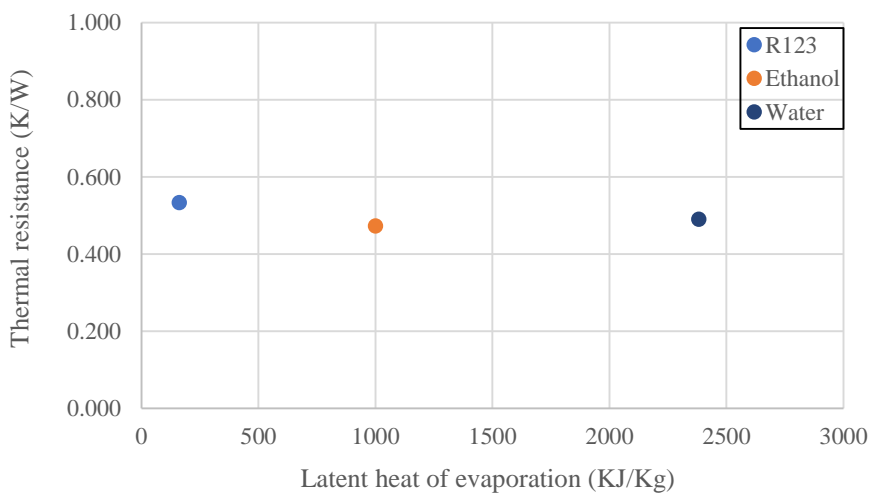
รูปที่ ๑.23 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



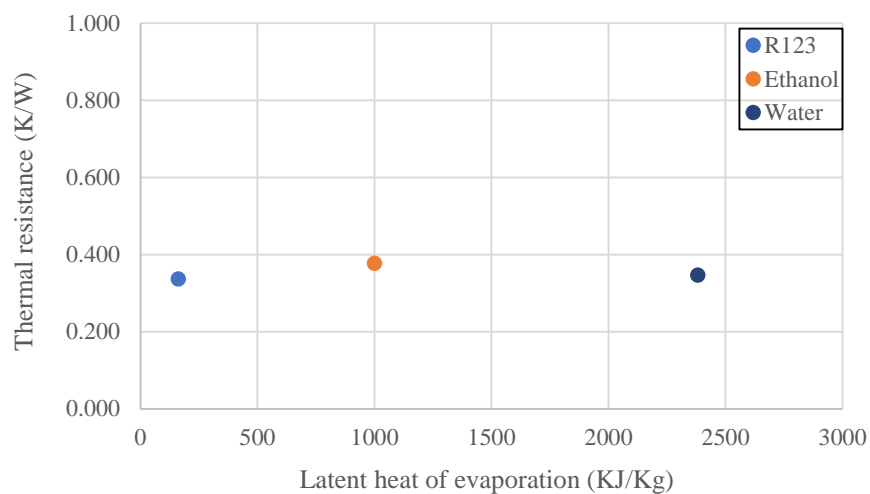
รูปที่ ๑.24 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



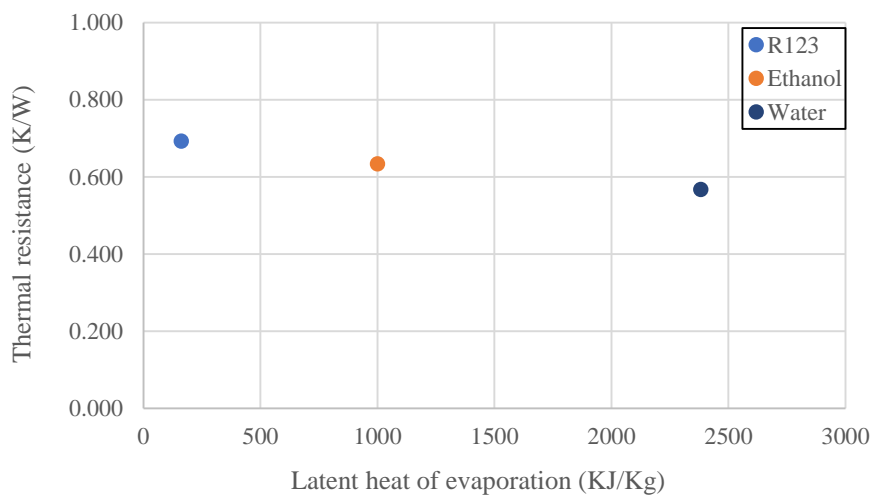
รูปที่ ๑.25 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 100 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



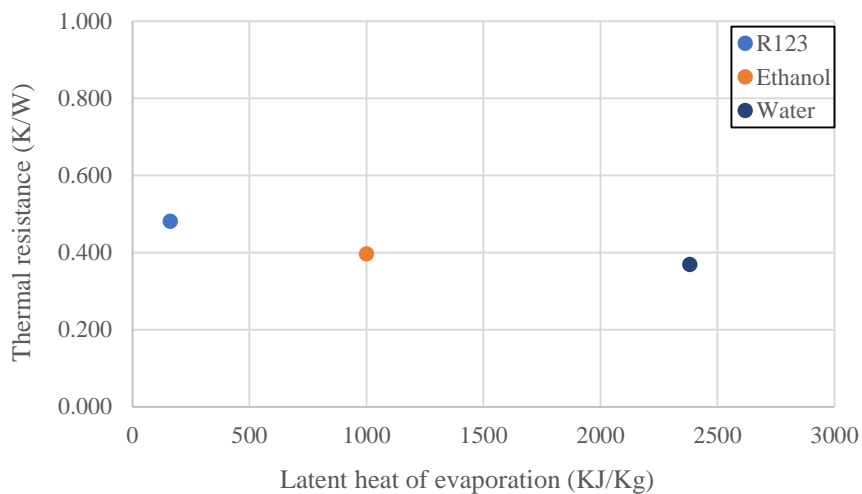
รูปที่ ๑.26 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 100 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



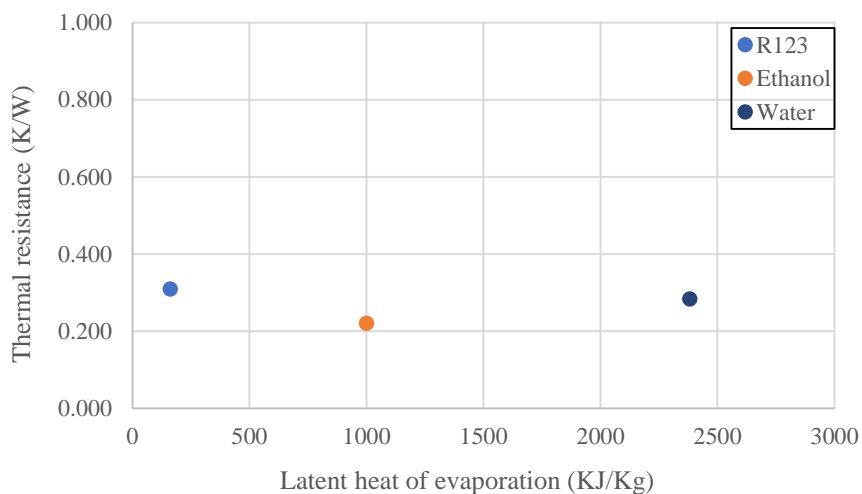
รูปที่ ๑.27 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



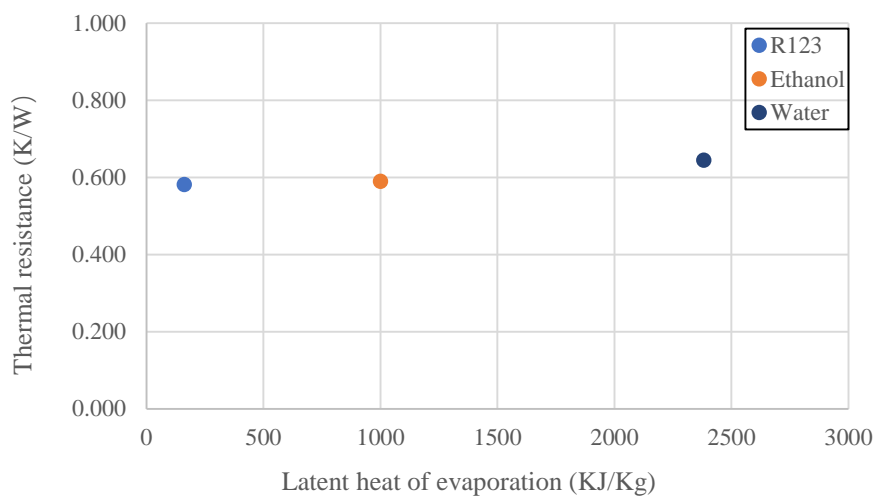
รูปที่ ๑.28 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



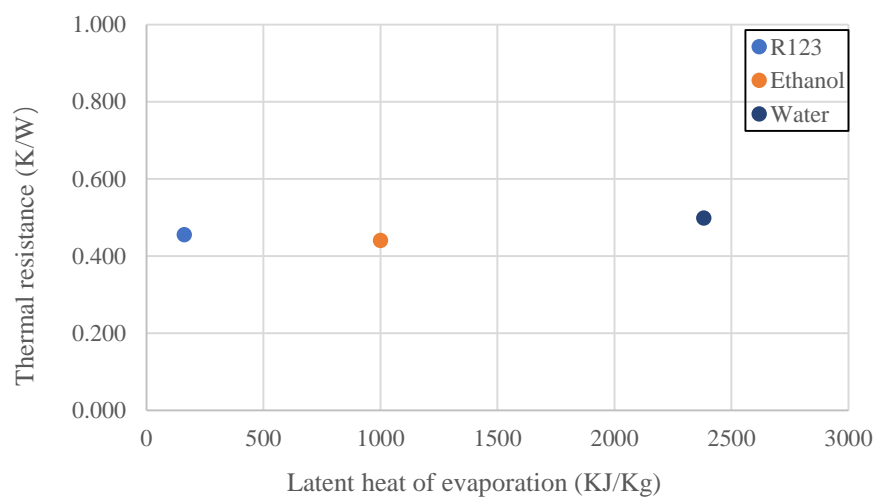
รูปที่ ๑.29 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



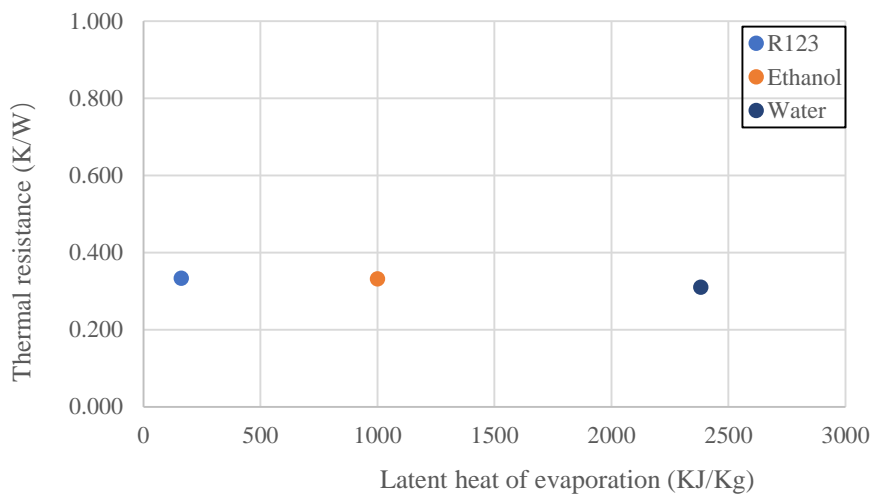
รูปที่ ๑.30 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



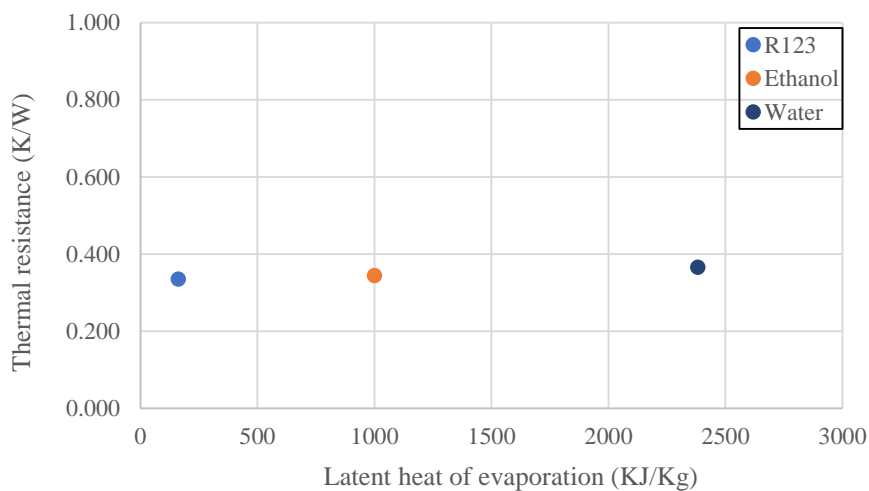
รูปที่ ๓.31 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



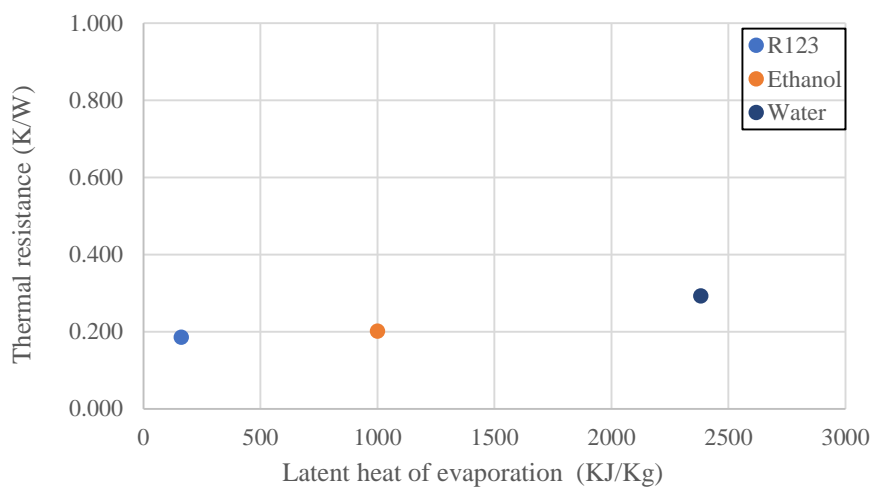
รูปที่ ๓.31 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



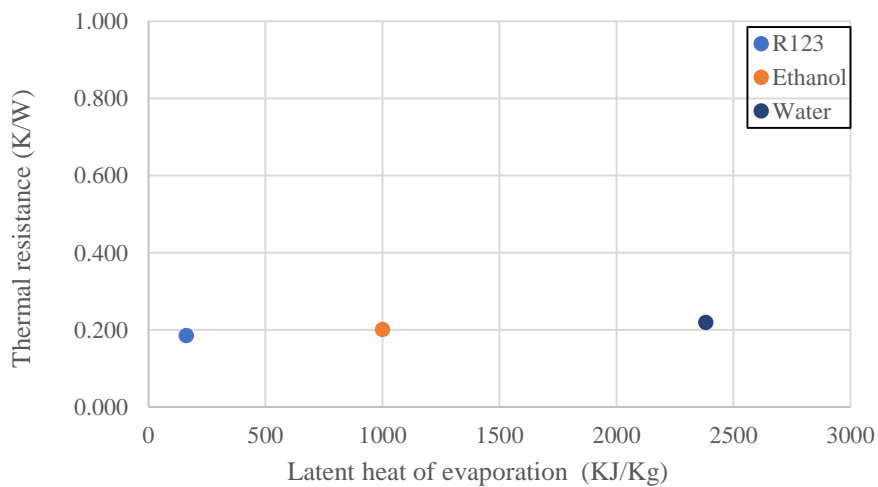
รูปที่ ๓.33 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



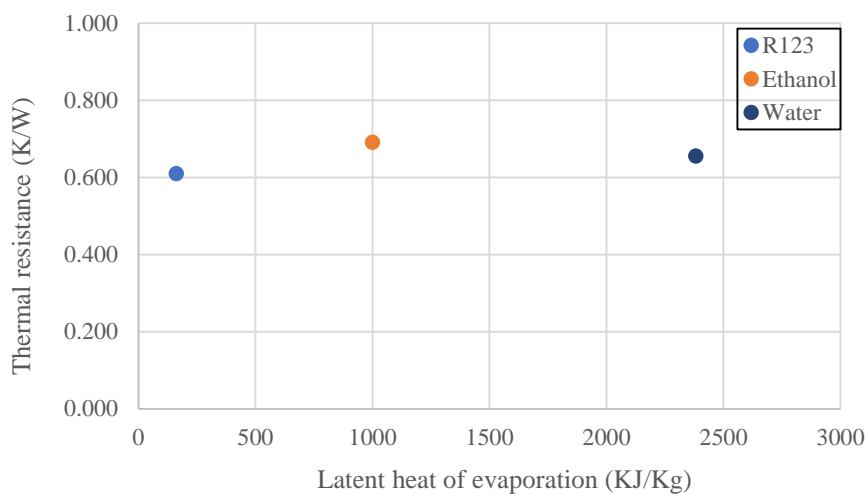
รูปที่ ๓.34 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



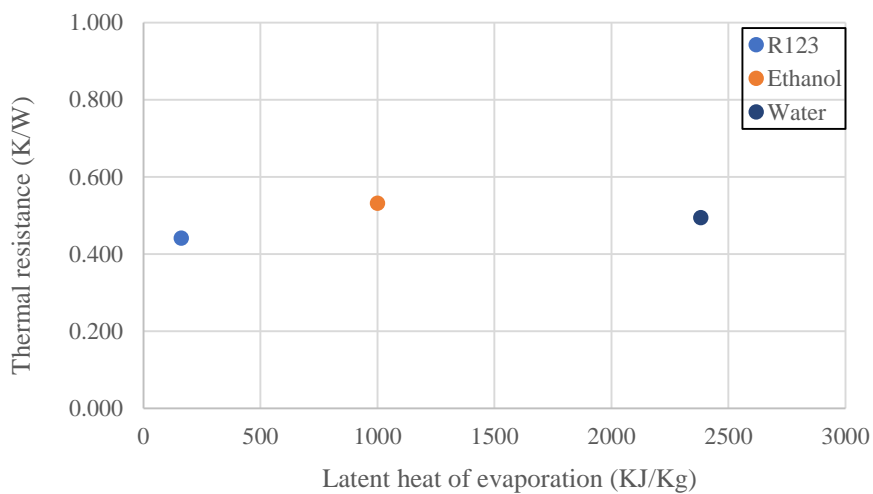
รูปที่ ๓.35 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



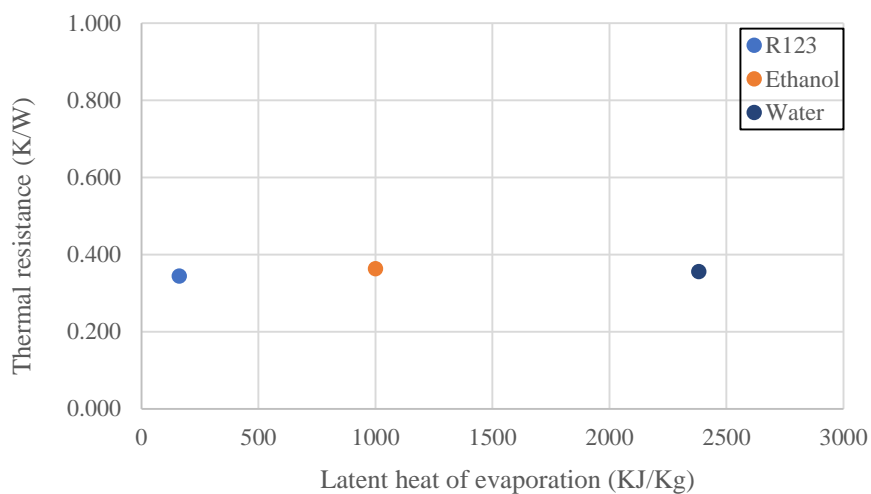
รูปที่ ๓.36 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



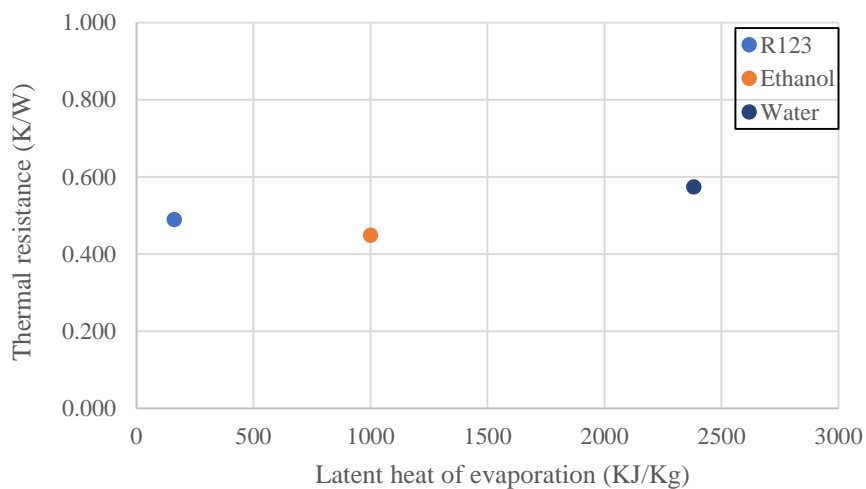
รูปที่ ๓.37 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



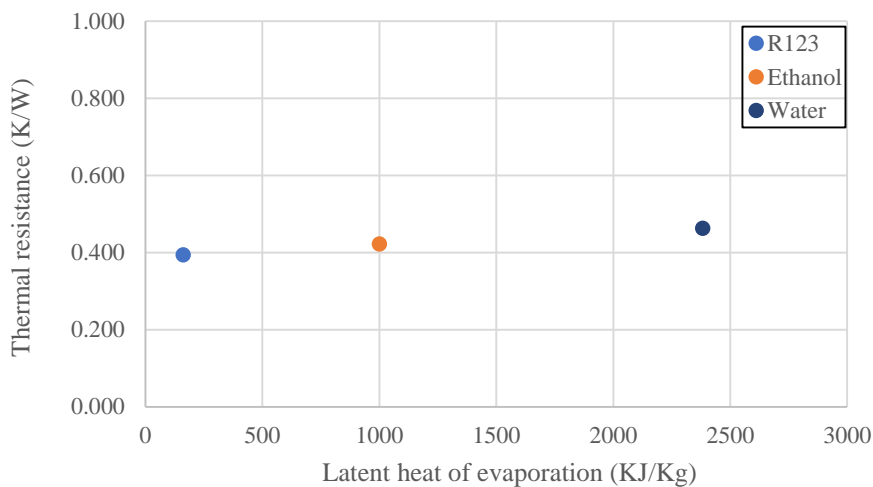
รูปที่ ๓.38 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



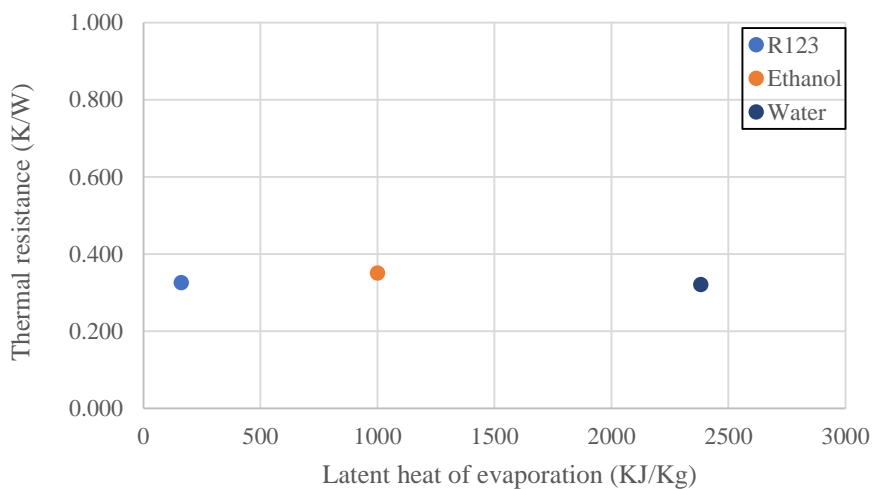
รูปที่ ๑.39 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



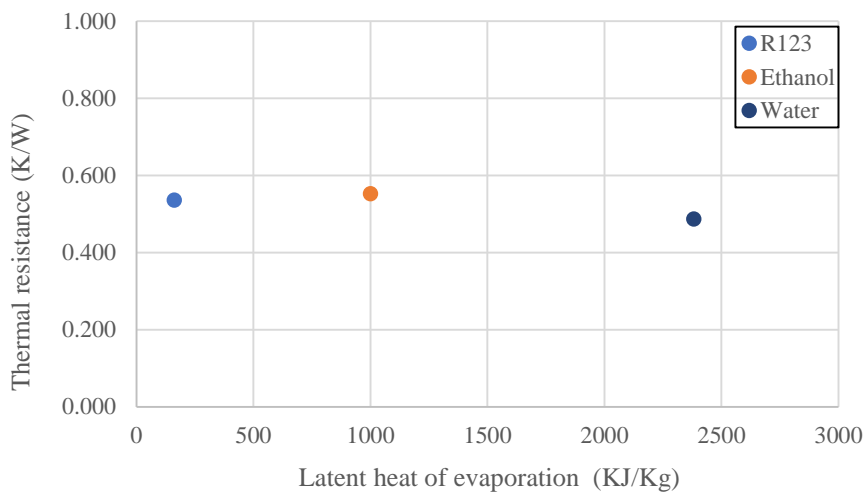
รูปที่ ๑.40 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



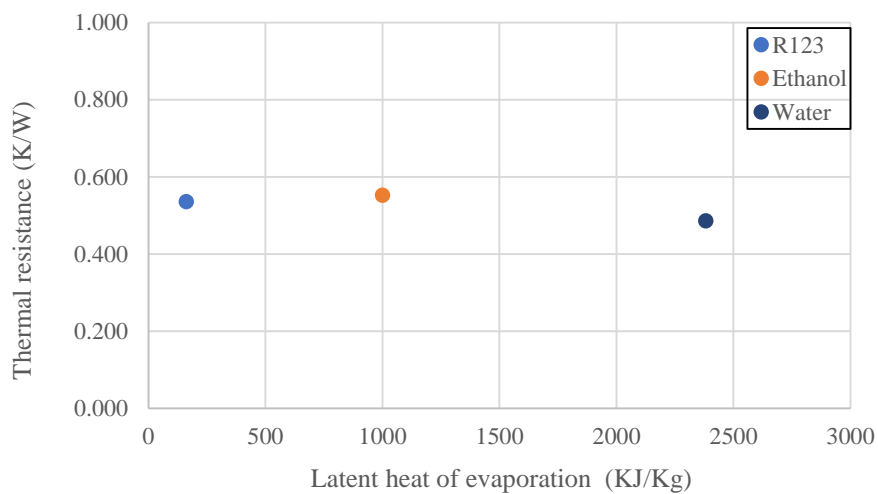
รูปที่ ๑.41 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



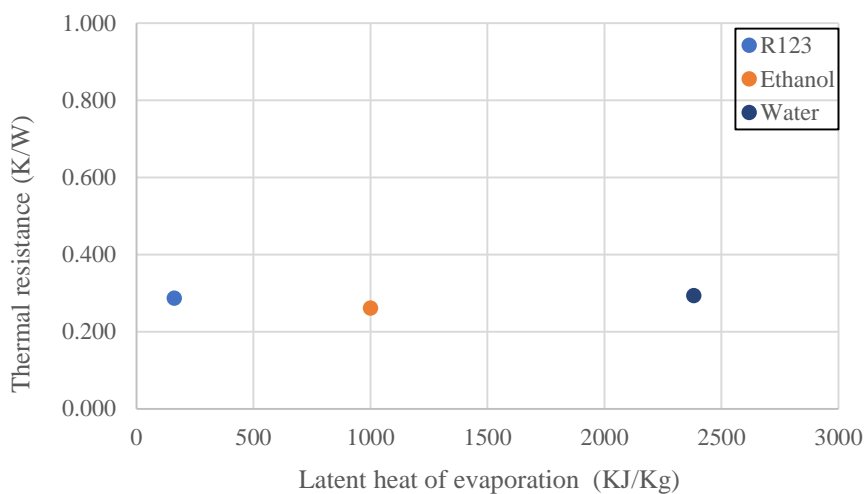
รูปที่ ๑.42 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



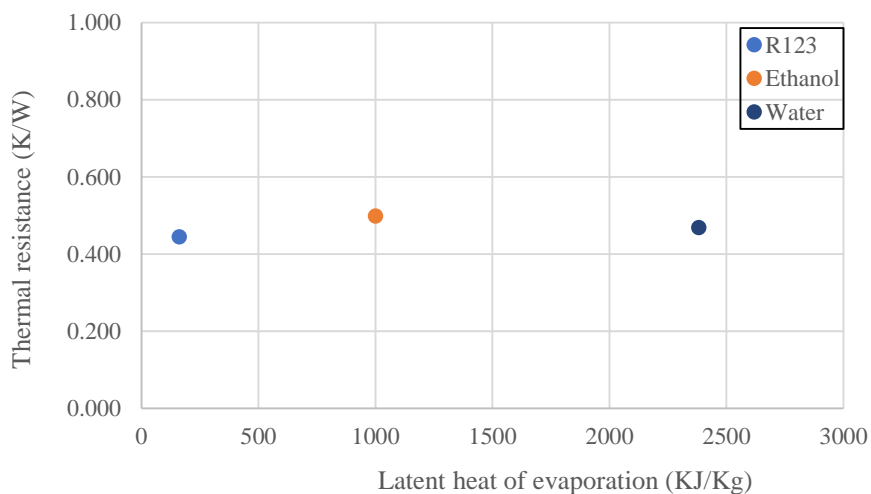
รูปที่ ๑.43 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



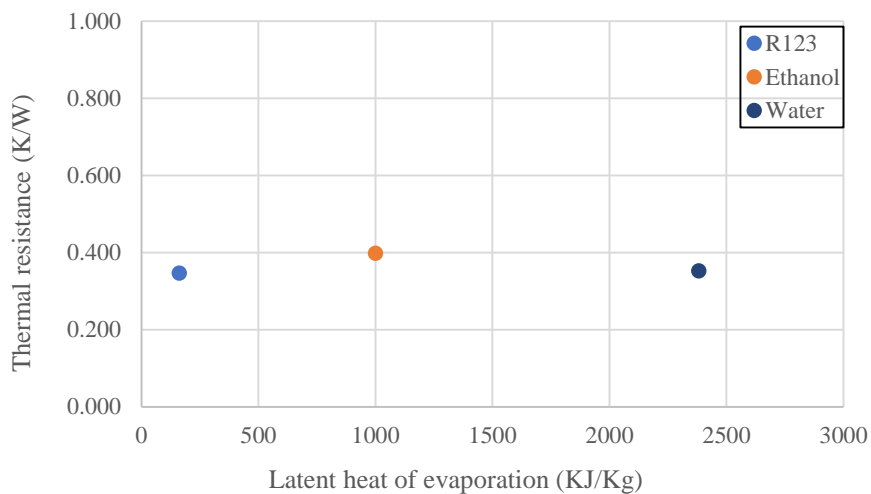
รูปที่ ๑.44 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



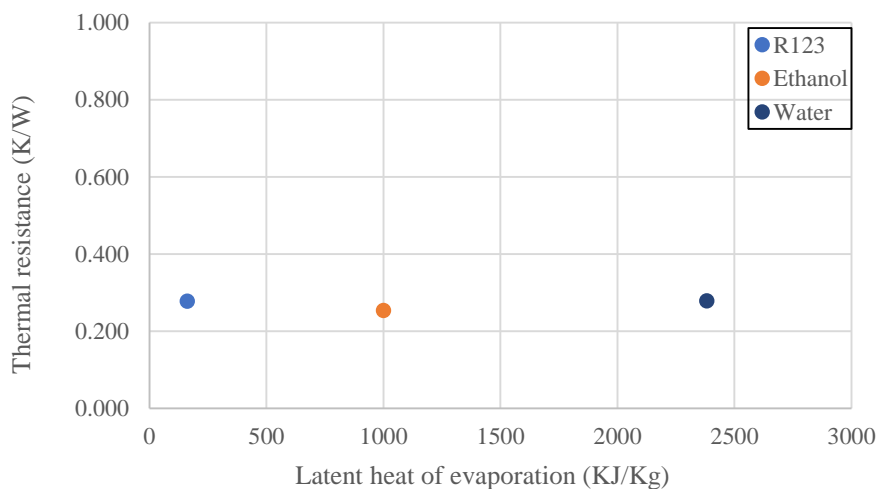
รูปที่ ๑.45 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



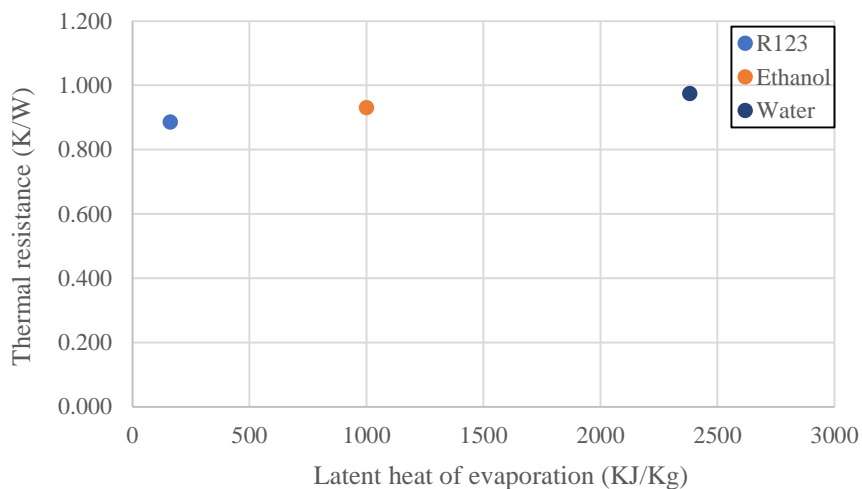
รูปที่ ๑.46 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



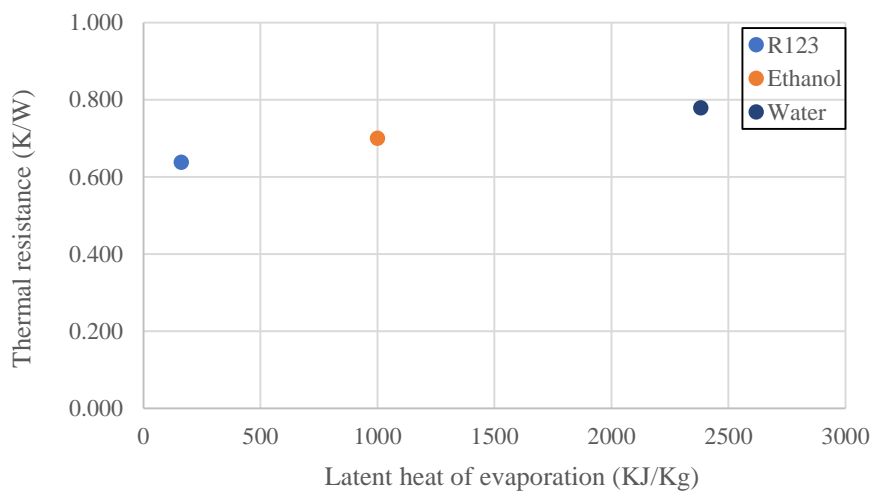
รูปที่ ๑.47 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



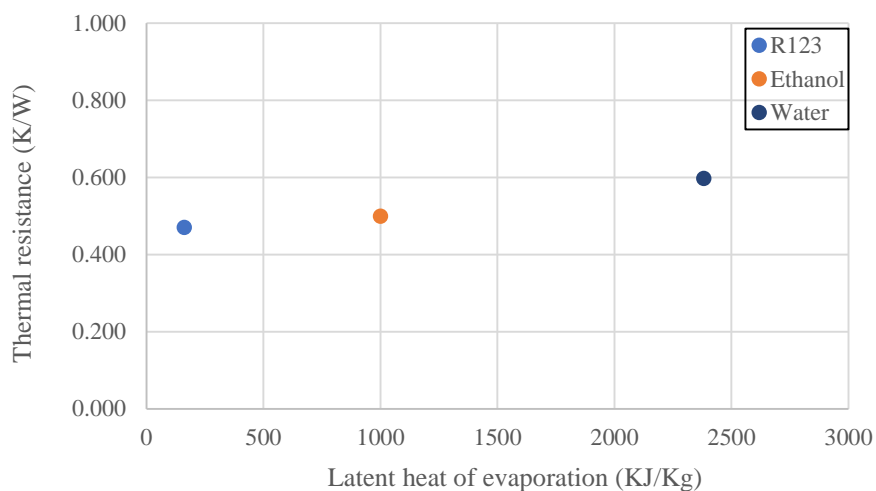
รูปที่ ๑.48 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



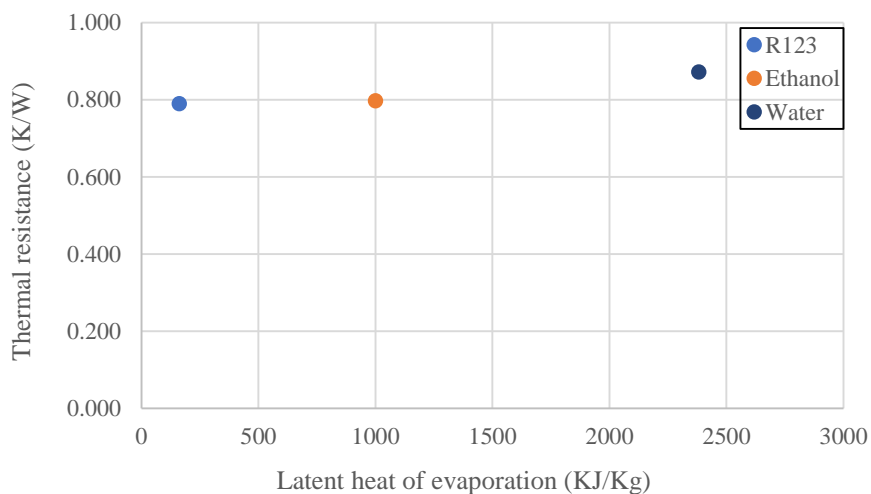
รูปที่ ๔.49 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



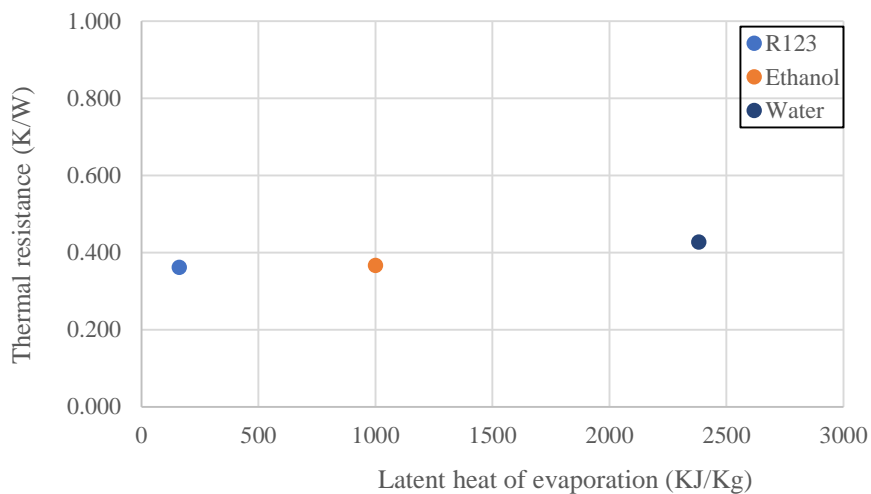
รูปที่ ๔.50 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



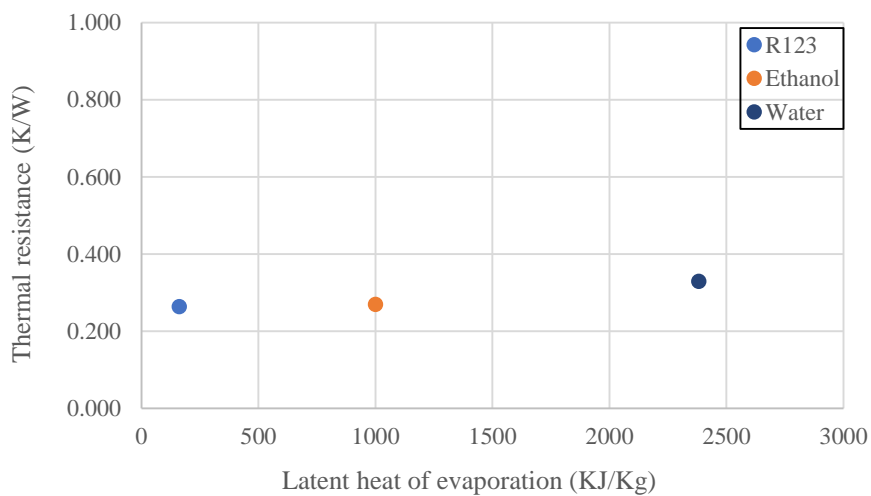
รูปที่ ๕.51 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



รูปที่ ๕.52 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)

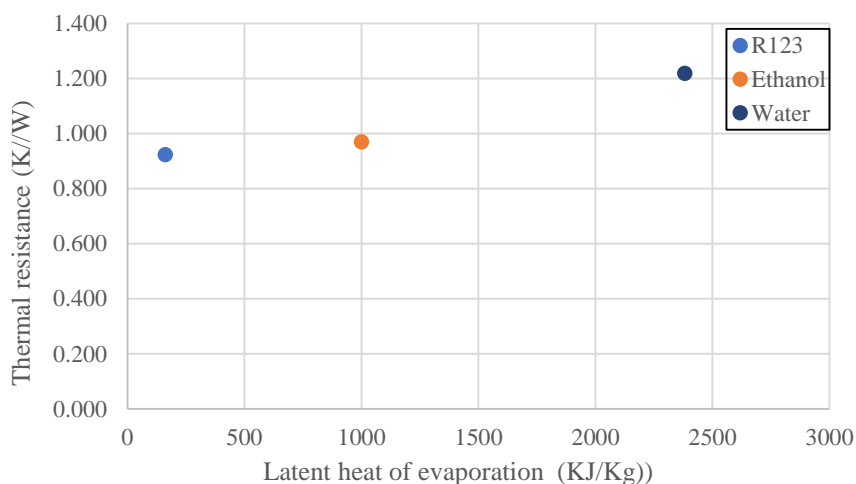


รูปที่ ๕.53 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)

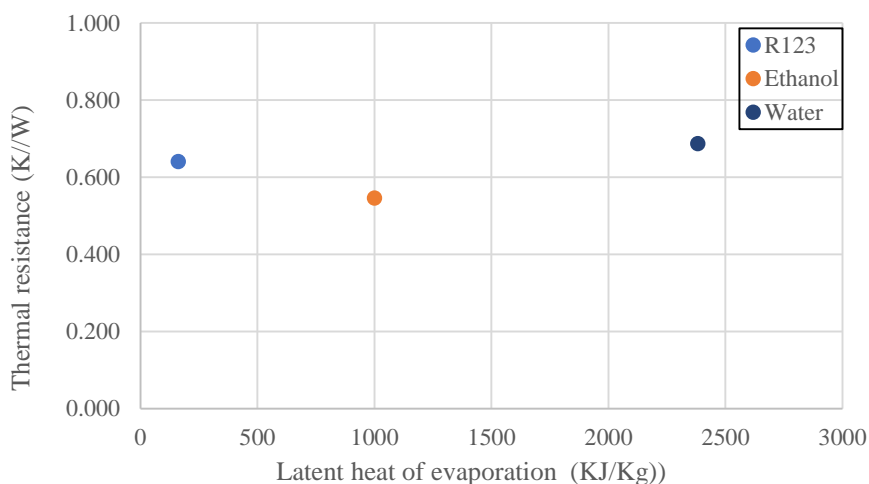


รูปที่ ๕.54 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)

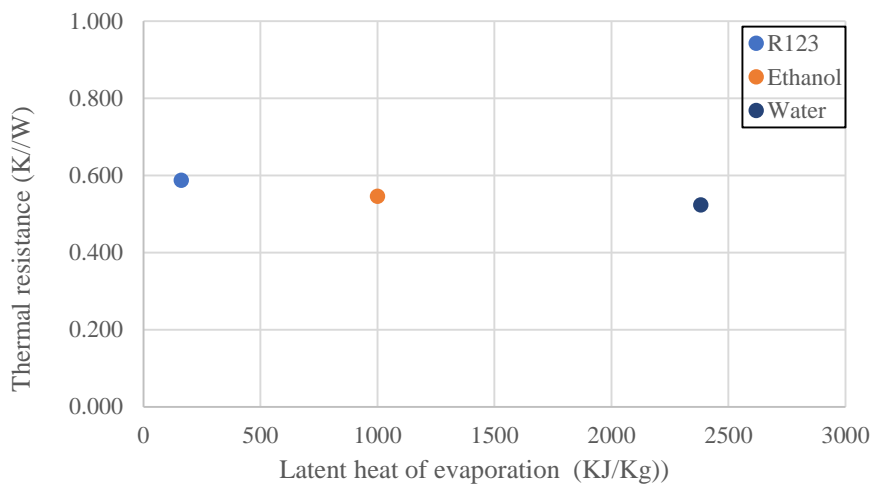
ผลของสารทำงานของการศึกษาผลกระทบของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณจรวรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยแต่ละรูปจะแสดงความสัมพันธ์ของความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของแต่ละสารทำงานกับค่าความต้านทานความร้อนทั้งการวางชุดทดลองในแนวนอนและแนวตั้ง



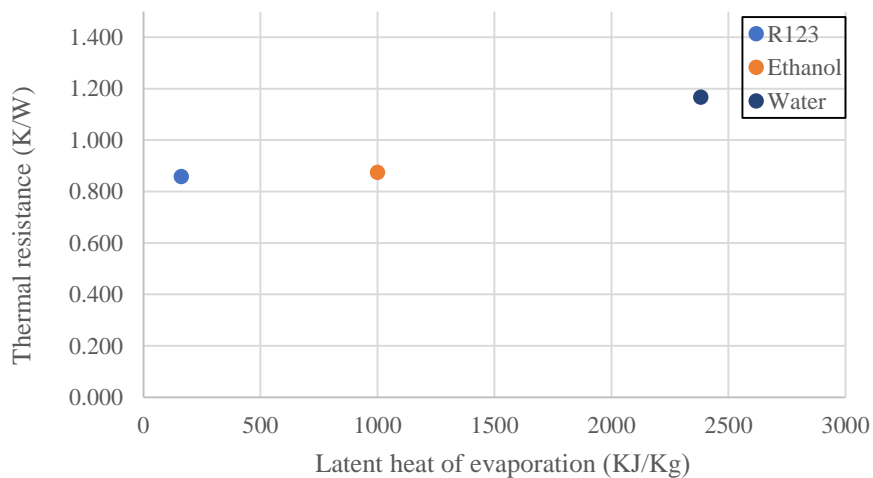
รูปที่ ๕.55 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



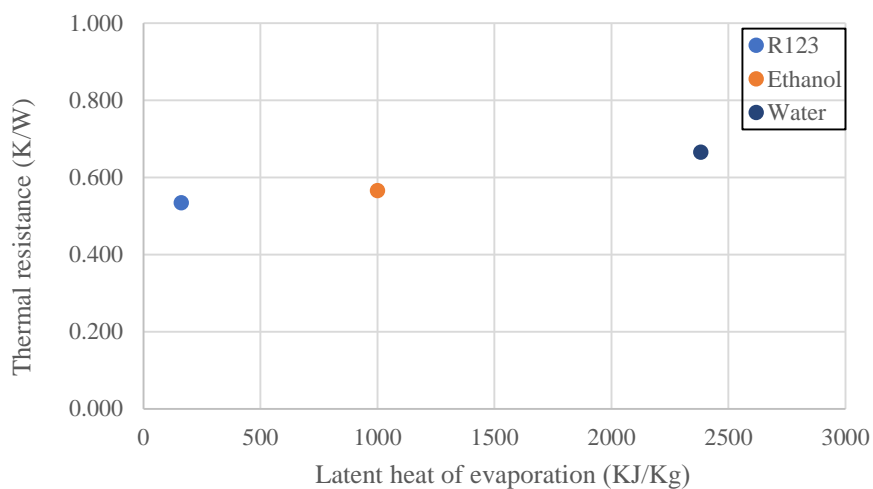
รูปที่ ๕.56 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



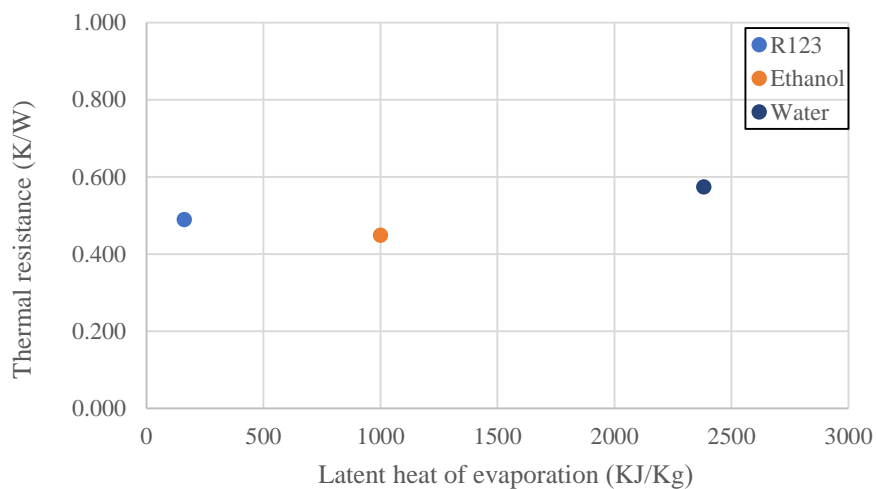
รูปที่ ๕.57 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



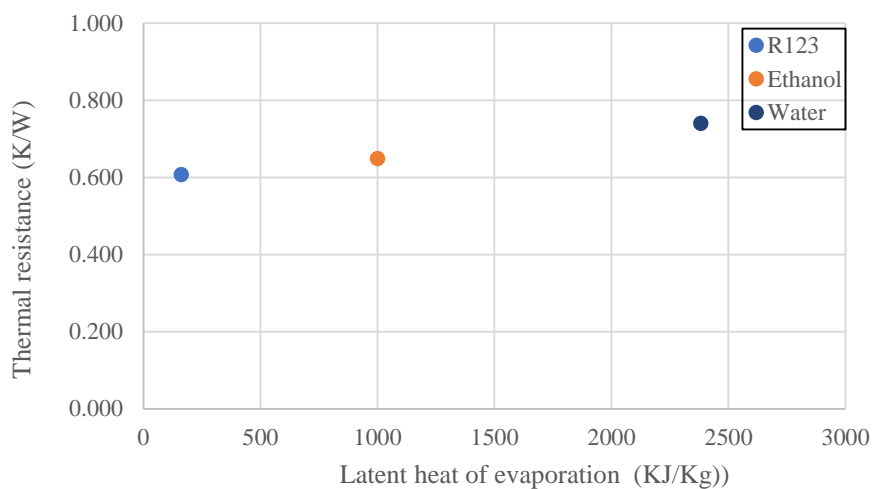
รูปที่ ๕.58 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



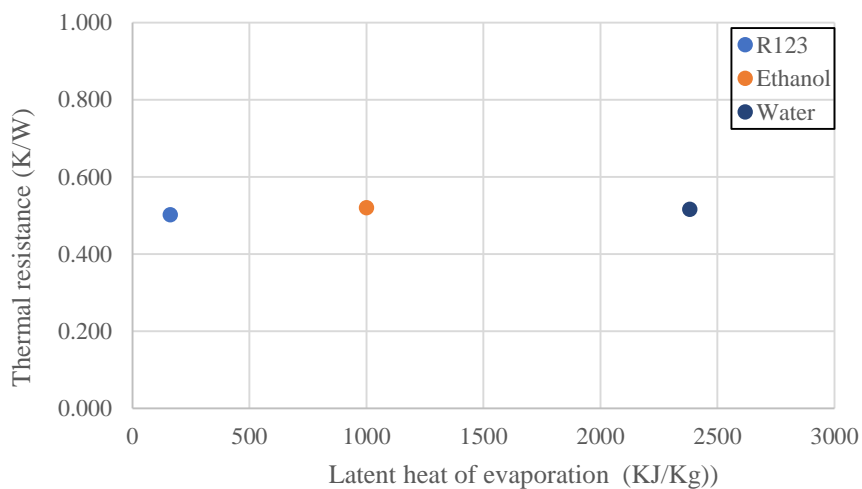
รูปที่ ๕.59 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



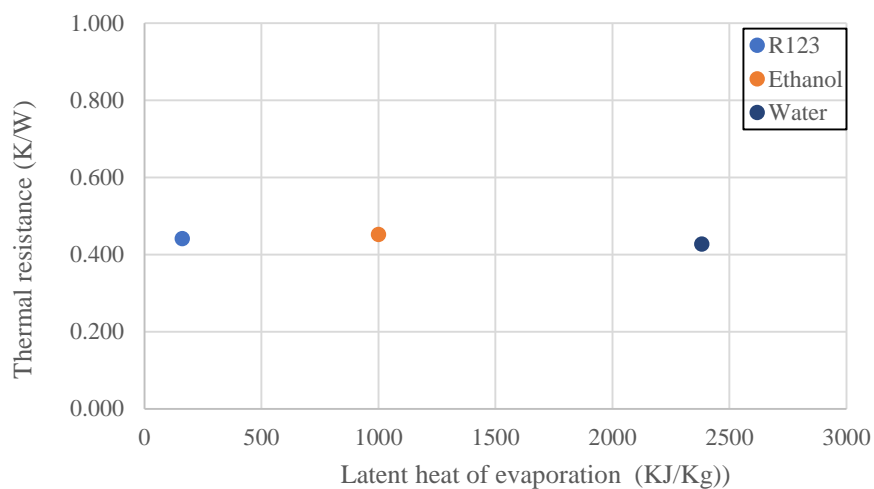
รูปที่ ๕.60 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



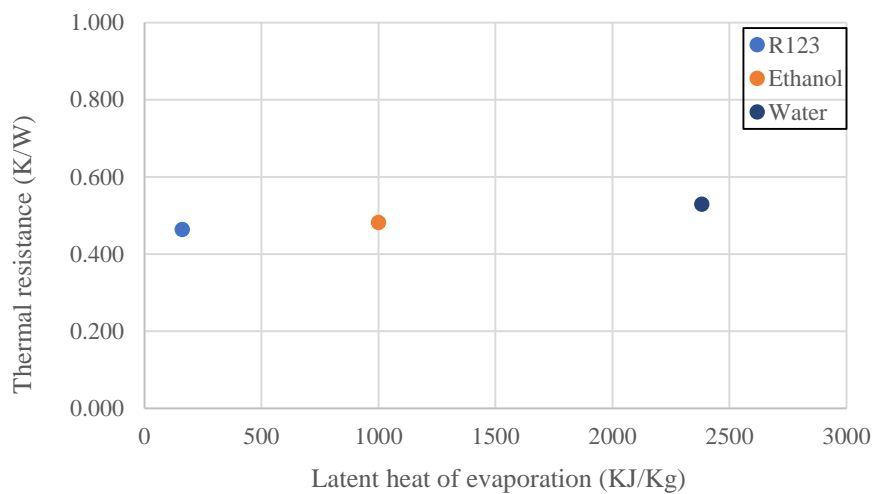
รูปที่ ๑.61 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



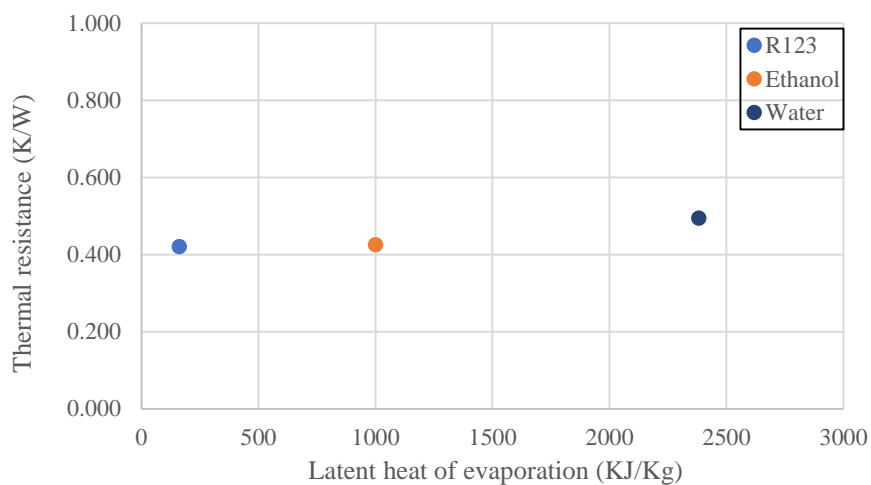
รูปที่ ๑.62 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



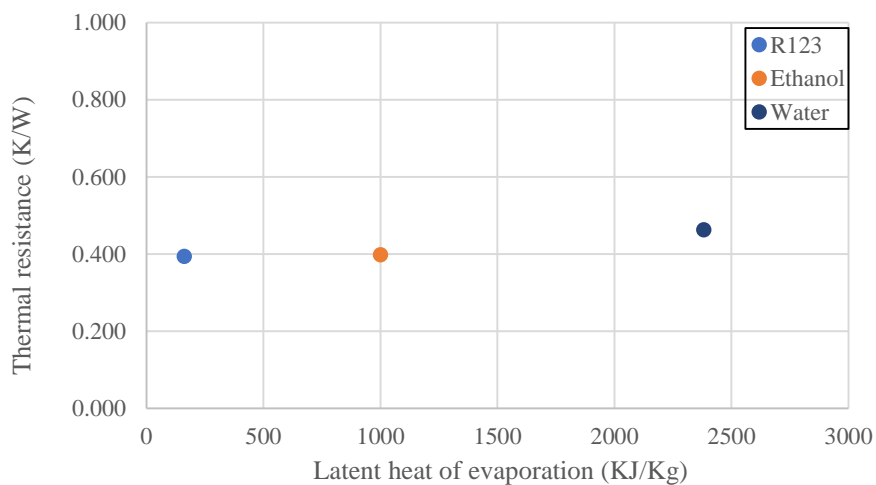
รูปที่ ๖.๖๓ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



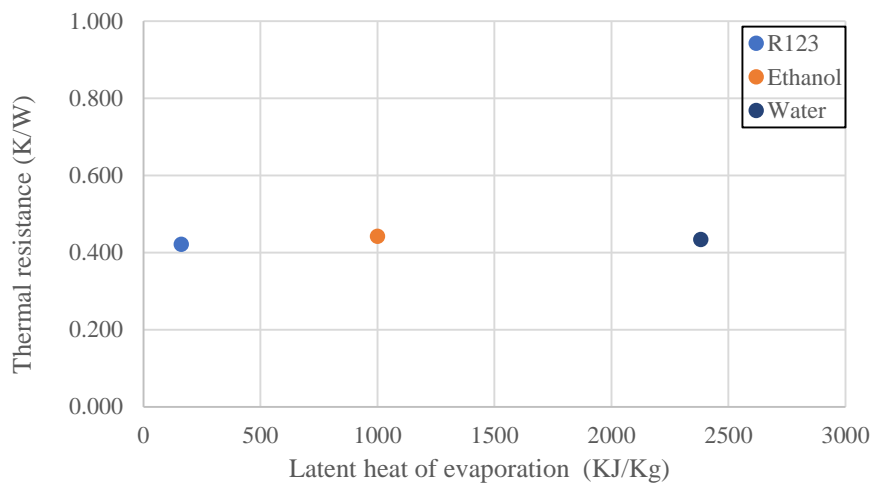
รูปที่ ๖.๖๔ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



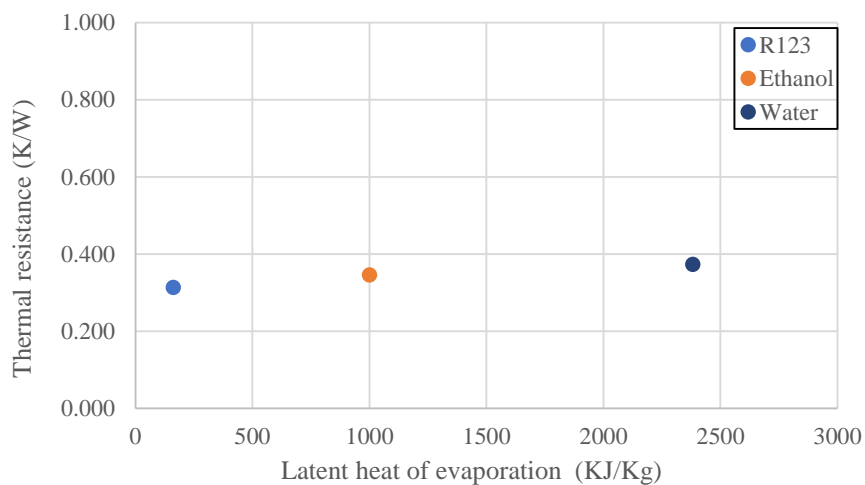
รูปที่ ๖.65 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



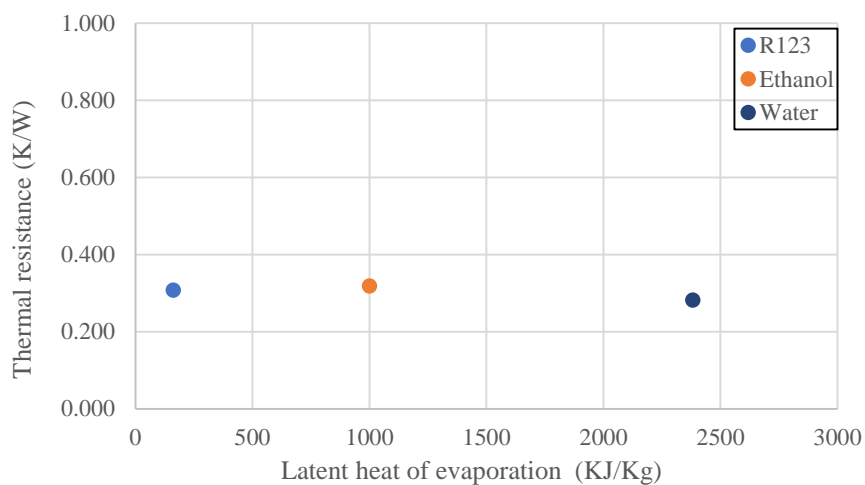
รูปที่ ๖.66 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



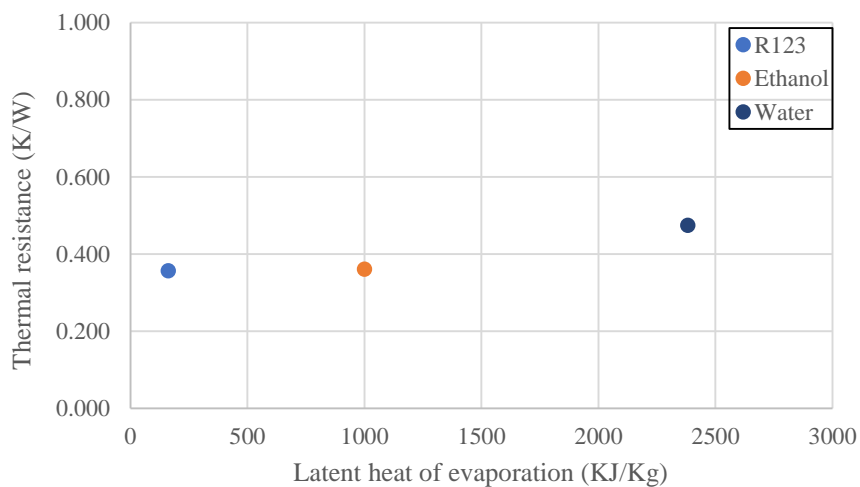
รูปที่ ๖.๖๗ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



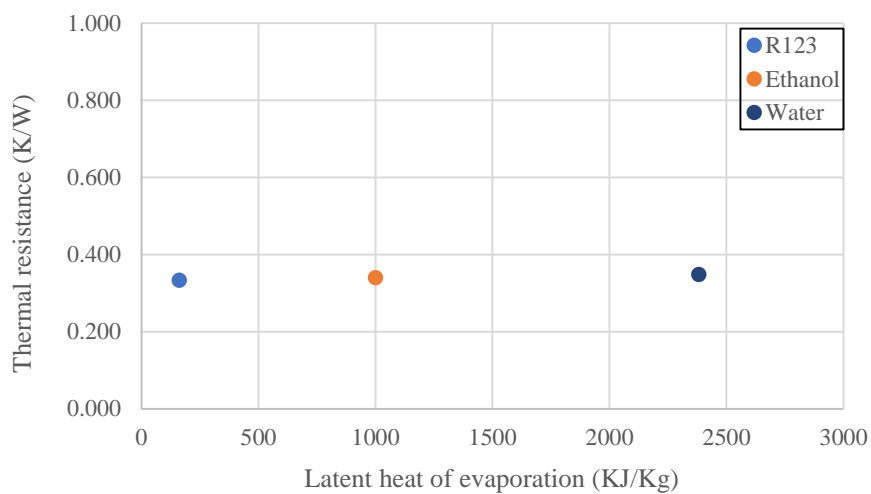
รูปที่ ๖.๖๘ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



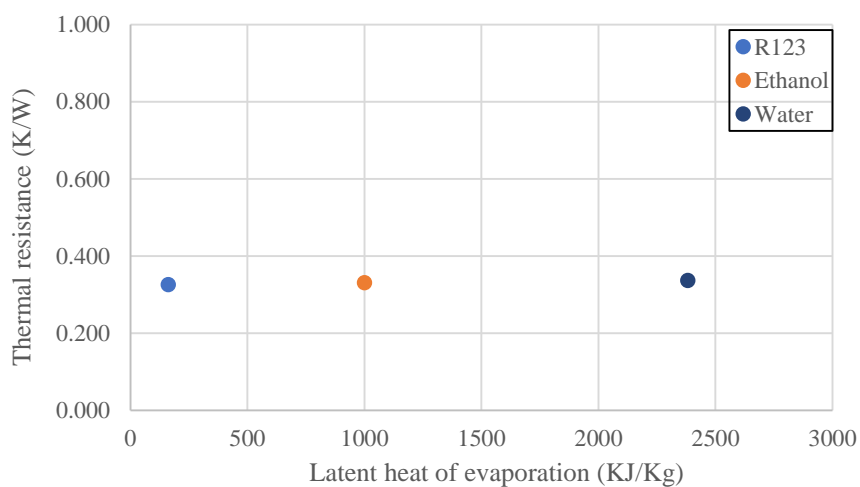
รูปที่ ๖.69 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



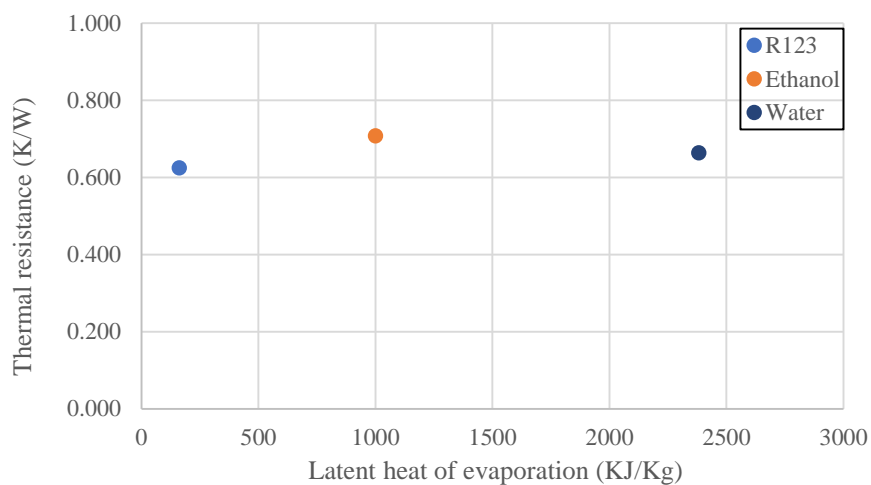
รูปที่ ๖.70 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



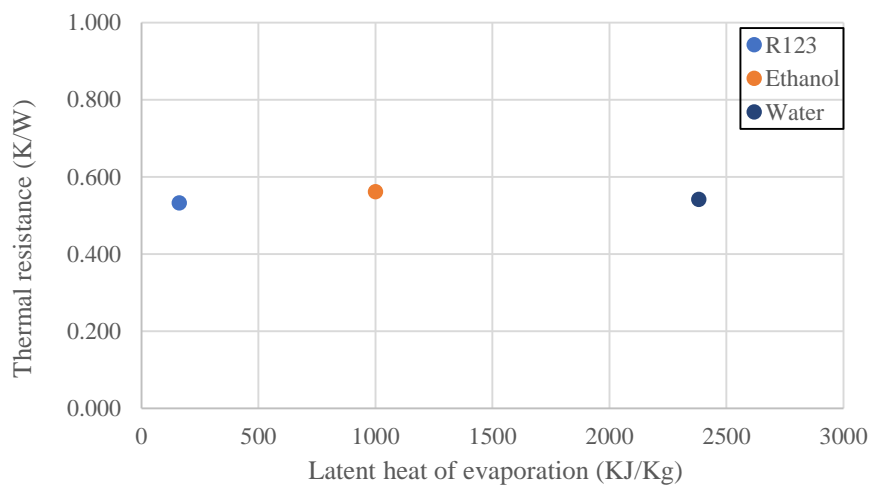
รูปที่ ๗.71 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



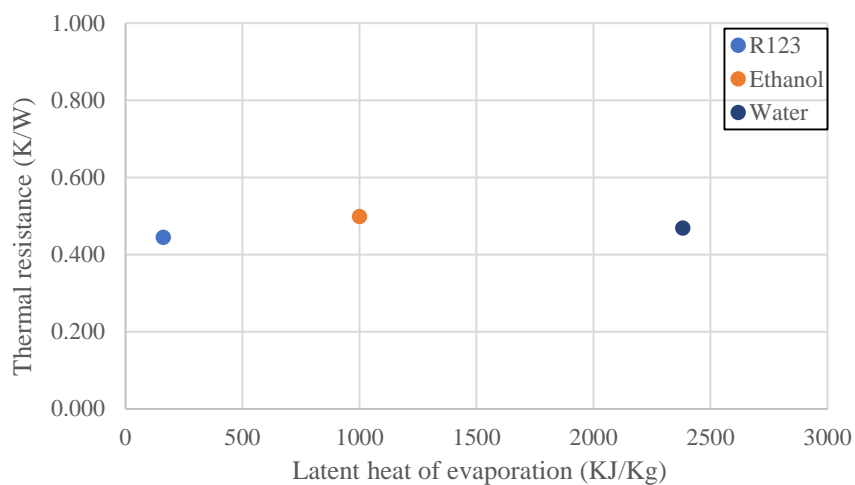
รูปที่ ๗.72 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



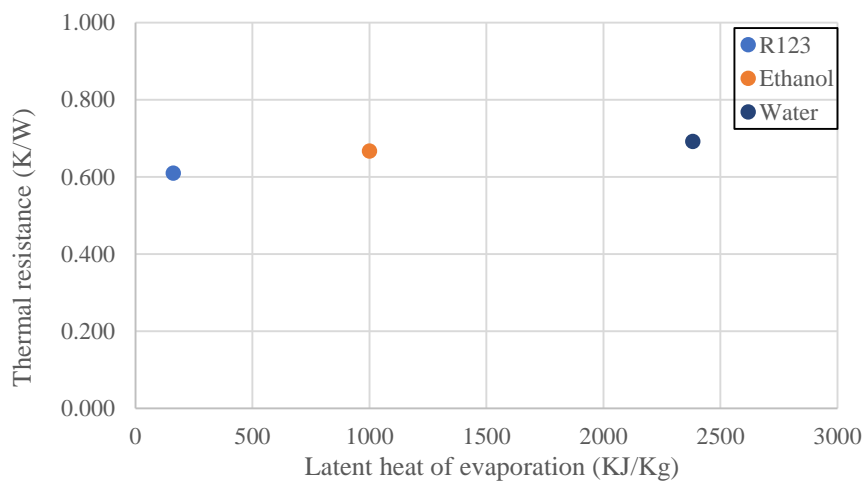
รูปที่ ๗.73 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



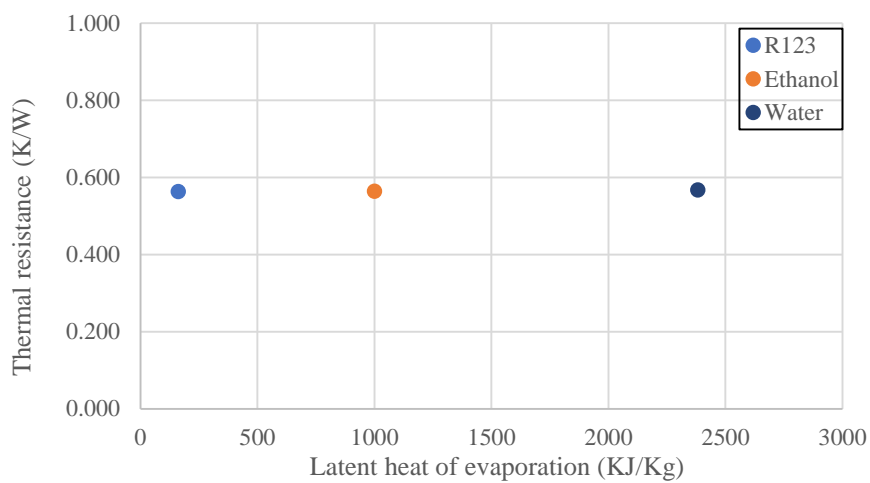
รูปที่ ๗.74 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



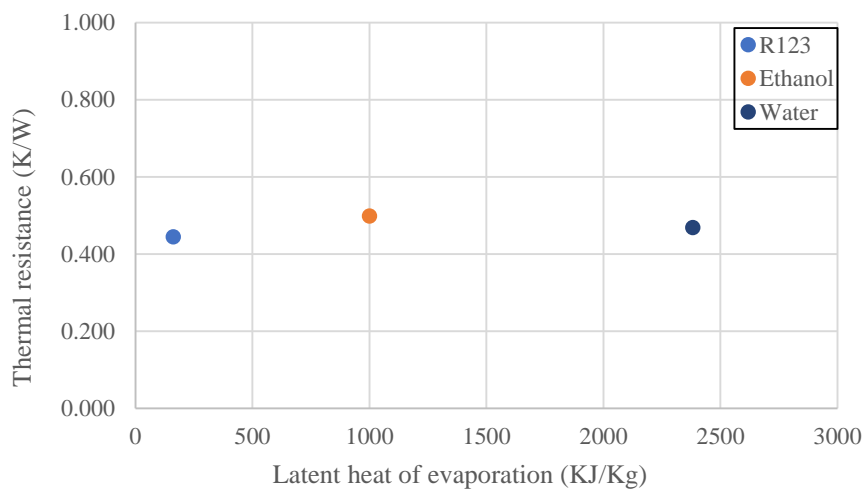
รูปที่ ๗.75 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



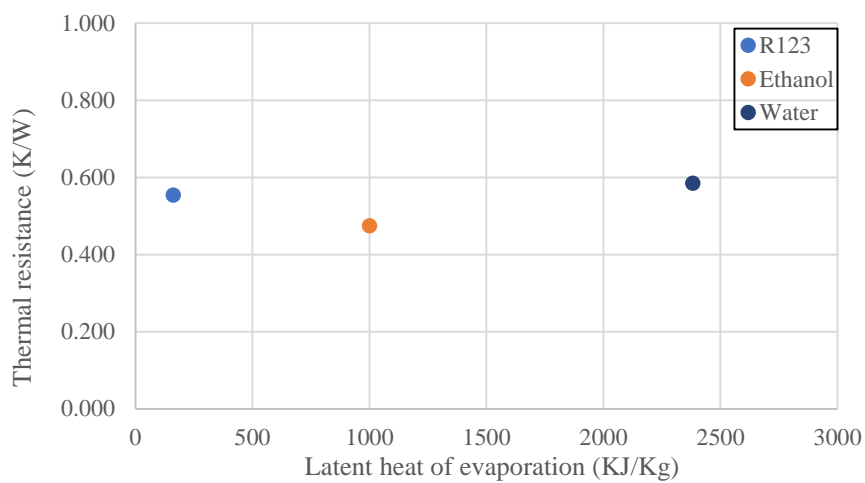
รูปที่ ๗.76 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



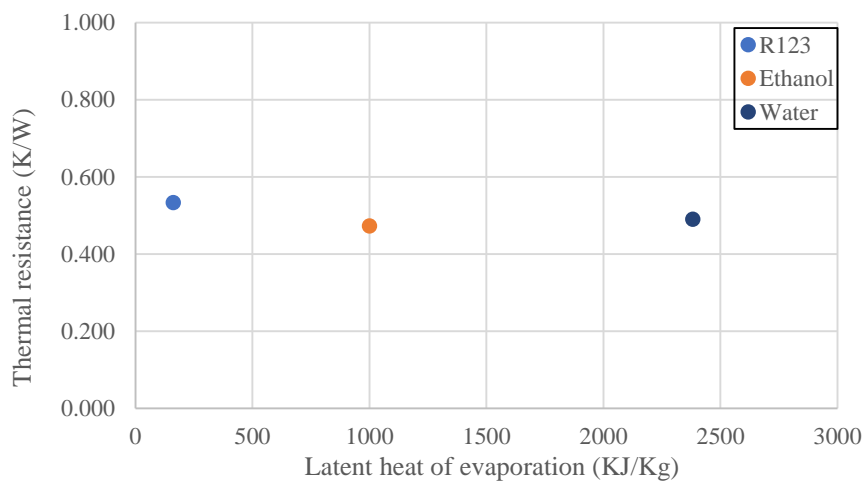
รูปที่ ๗.๗๗ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



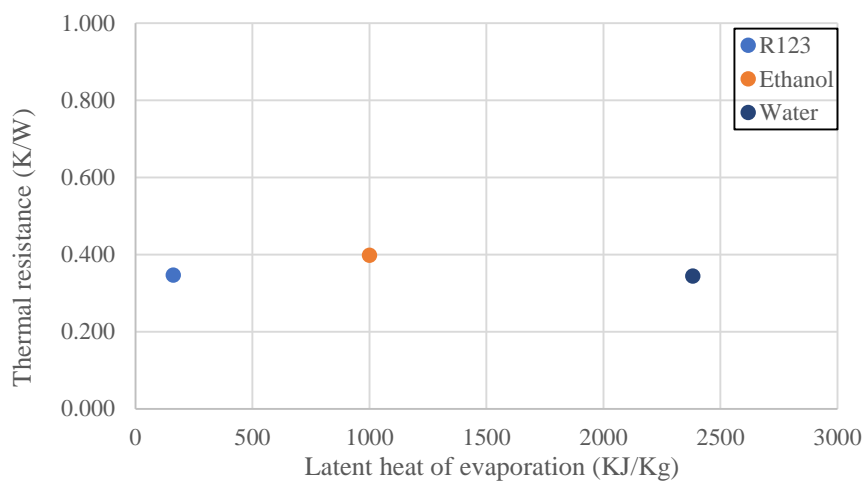
รูปที่ ๗.๗๘ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



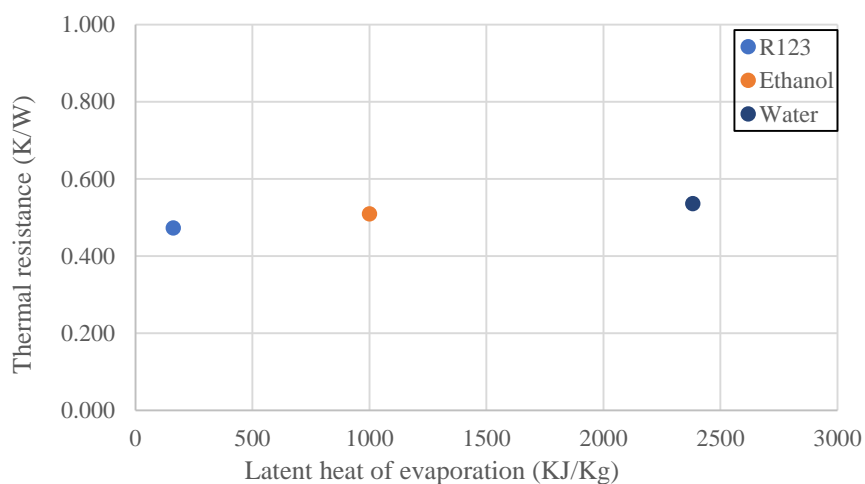
รูปที่ ๗.79 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



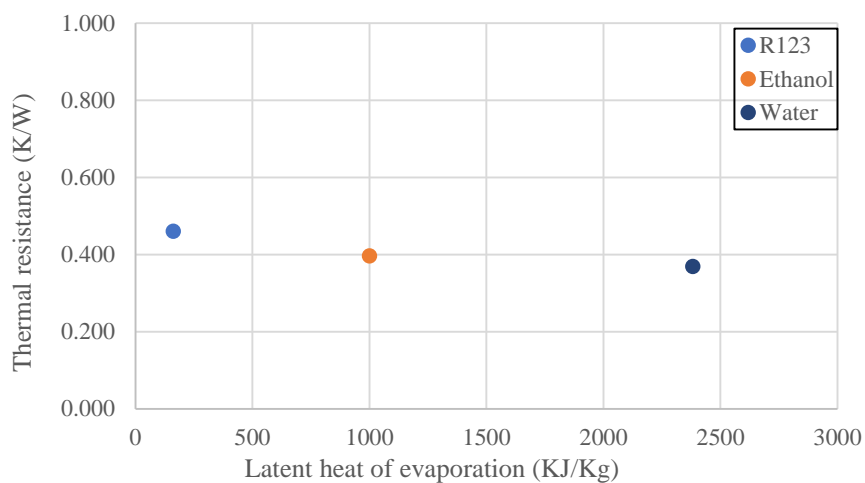
รูปที่ ๗.80 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



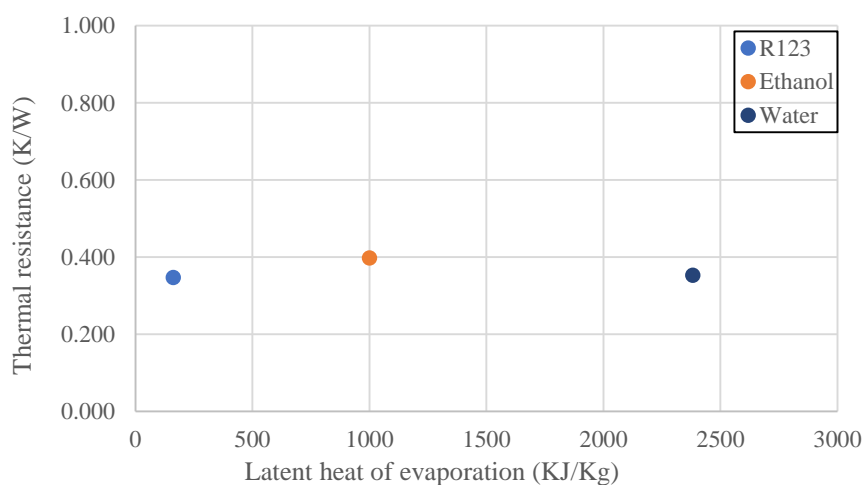
รูปที่ ๘.81 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



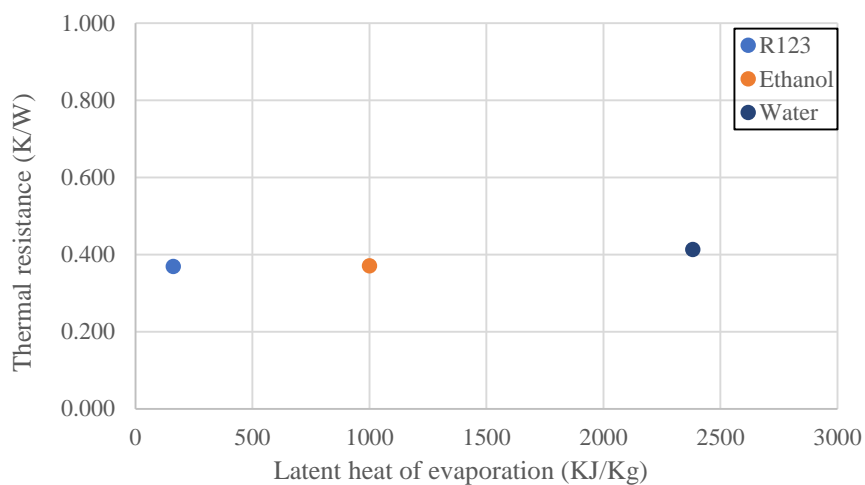
รูปที่ ๘.82 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



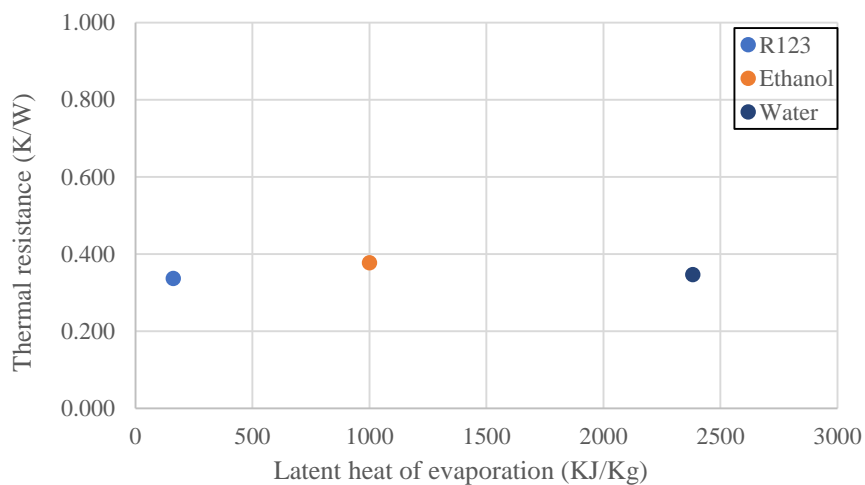
รูปที่ ๘.83 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



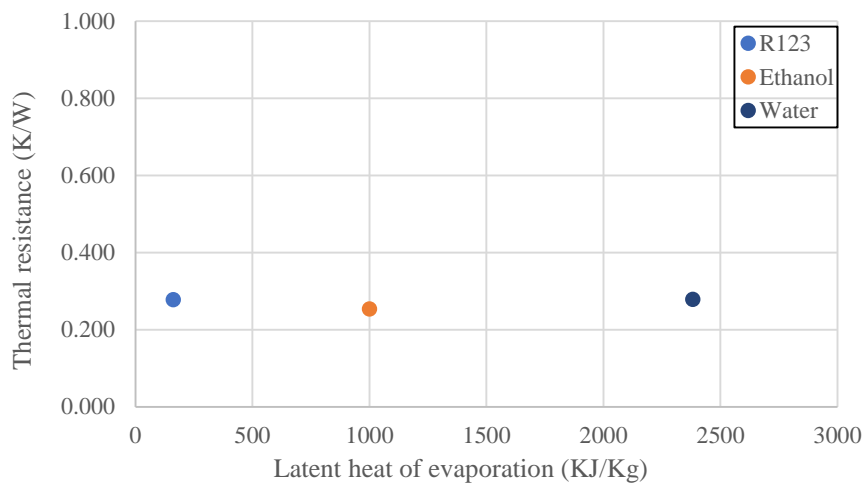
รูปที่ ๘.84 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



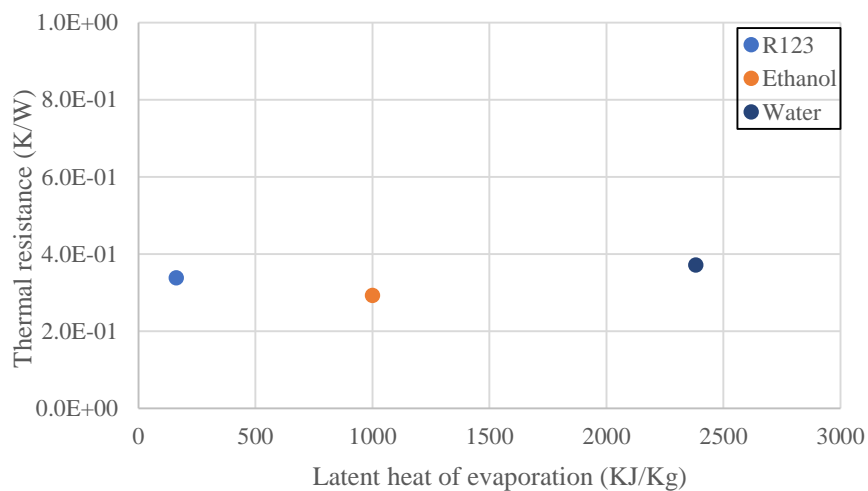
รูปที่ ๘.๘๕ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



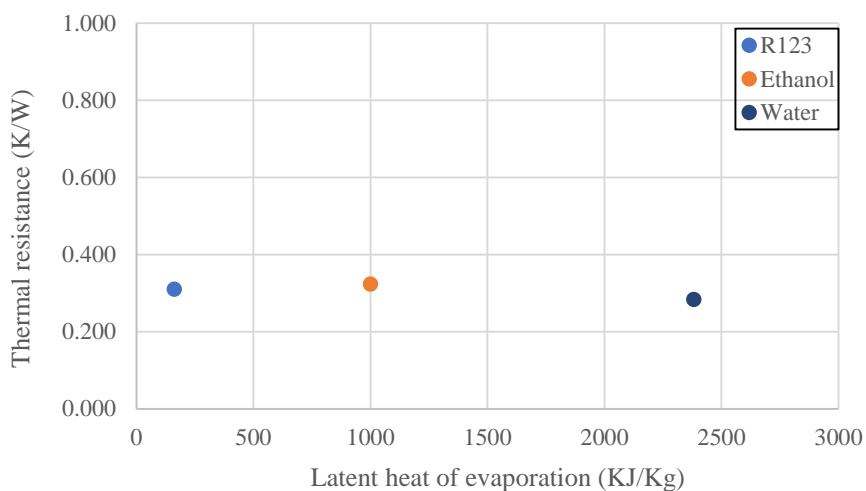
รูปที่ ๘.๘๖ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



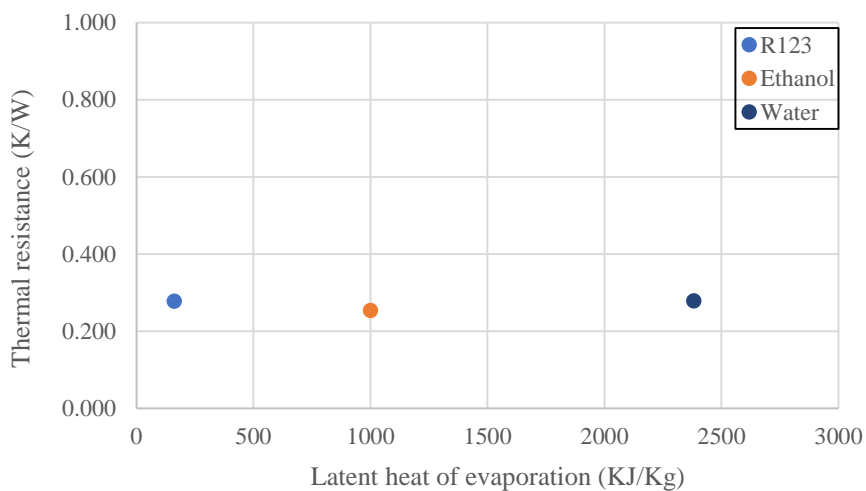
รูปที่ ๘.๘๗ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



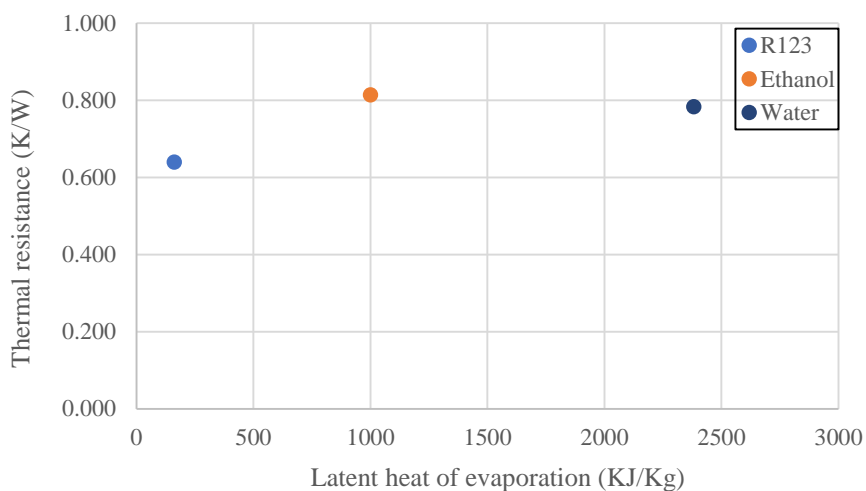
รูปที่ ๘.๘๘ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



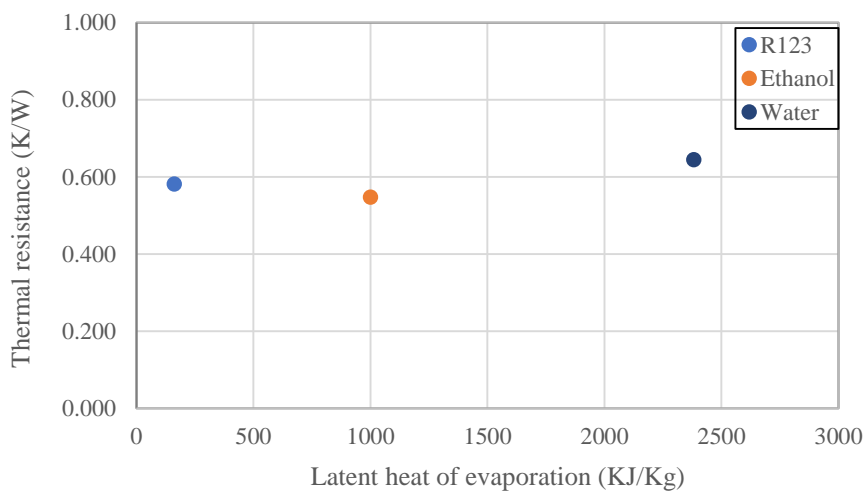
รูปที่ ๘.89 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



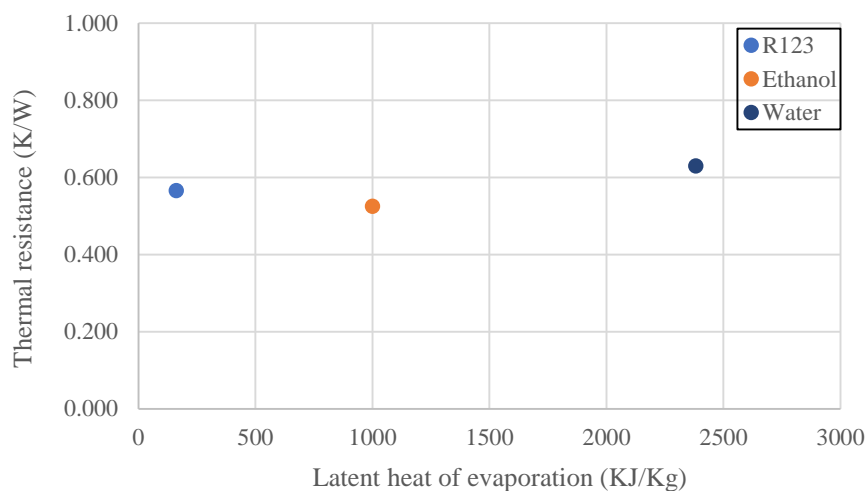
รูปที่ ๘.90 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



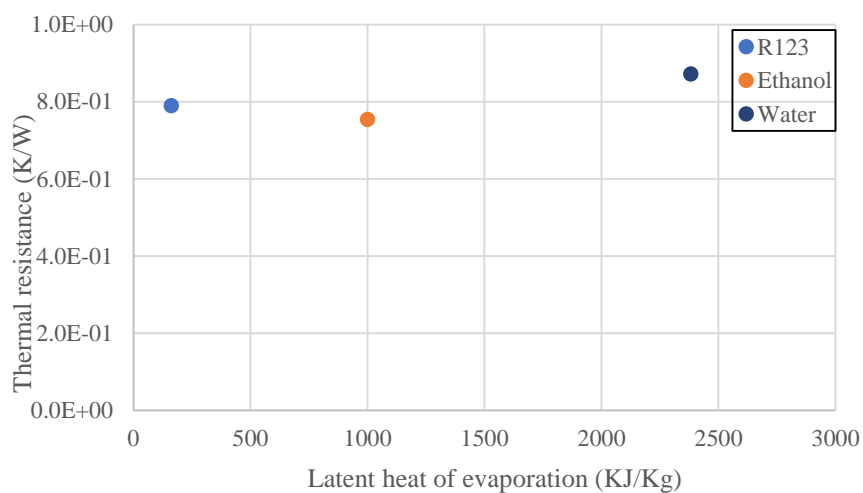
รูปที่ ๑.91 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



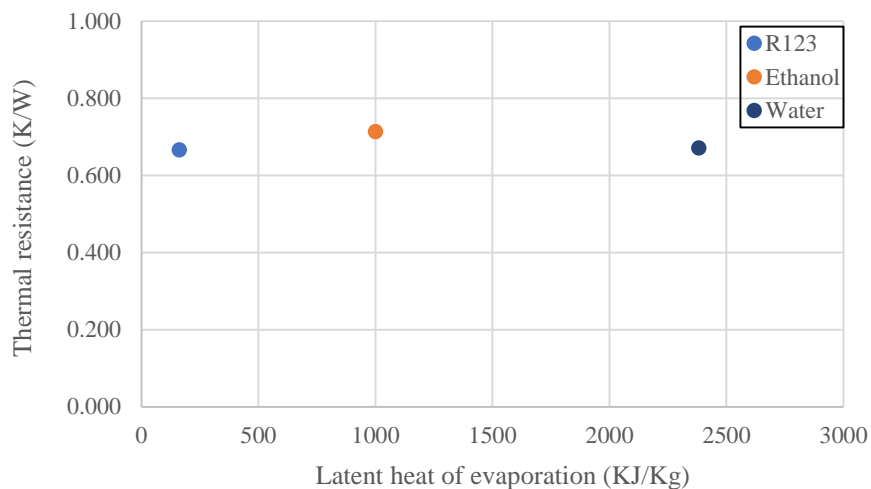
รูปที่ ๑.92 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



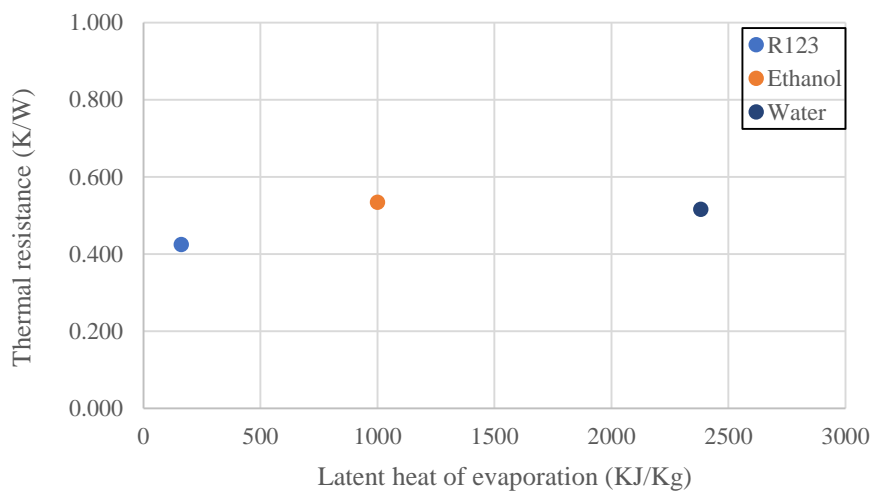
รูปที่ ๙.๙3 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 150 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



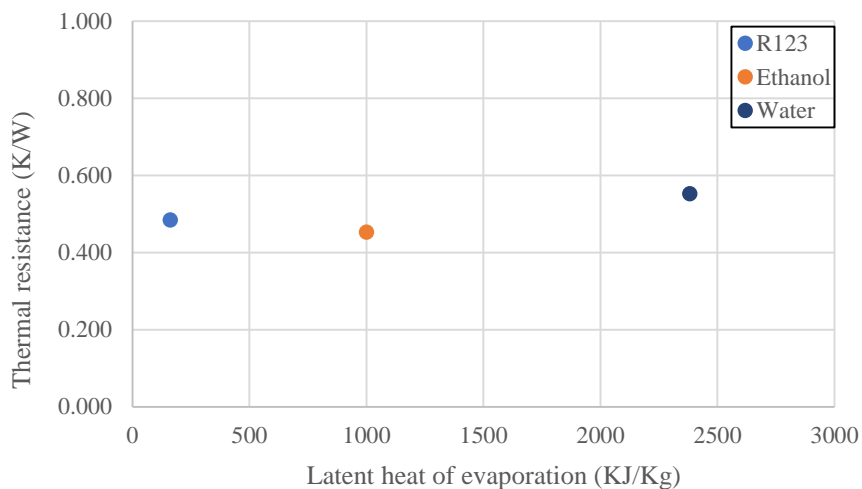
รูปที่ ๙.๙๔ แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $L_e = 50 \text{ mm}$ $D_i = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



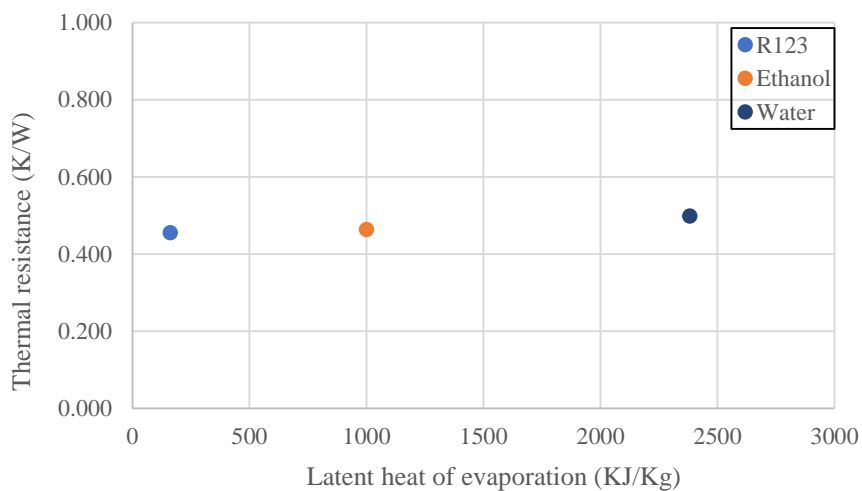
รูปที่ ๙.95 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



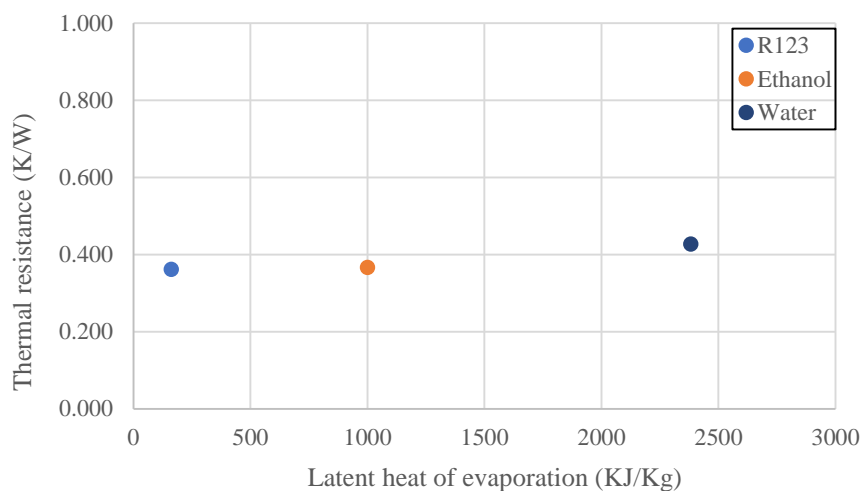
รูปที่ ๙.96 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



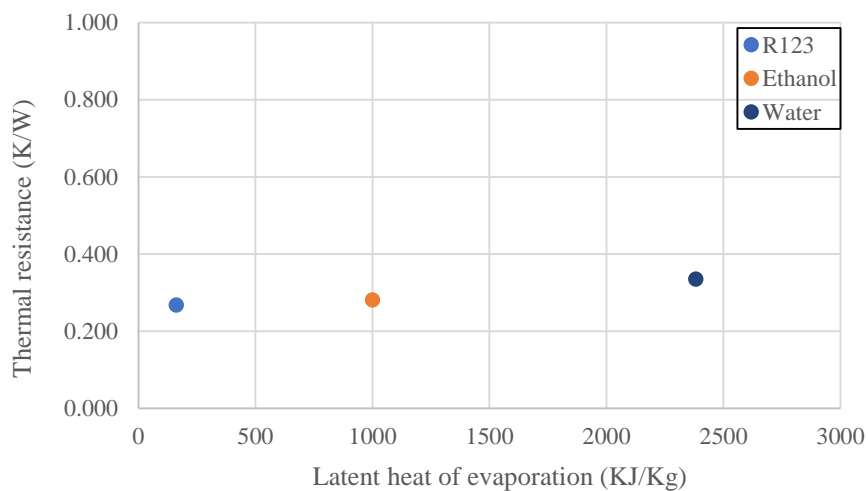
รูปที่ ๑.97 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



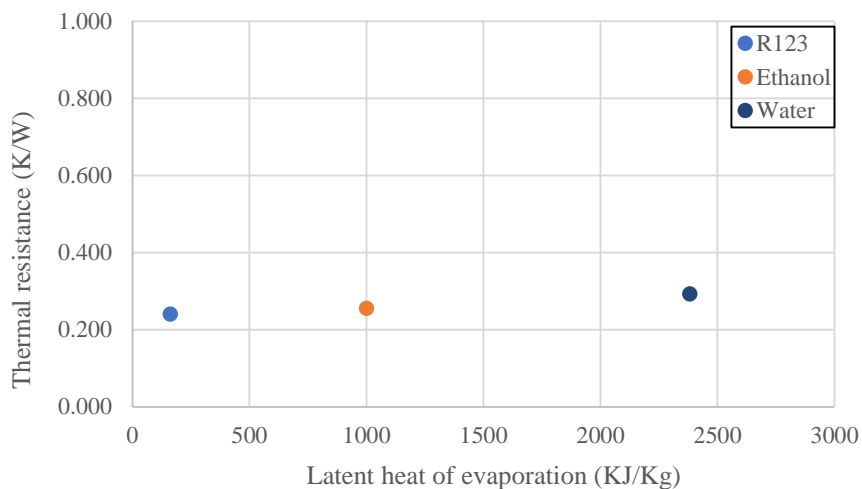
รูปที่ ๑.98 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



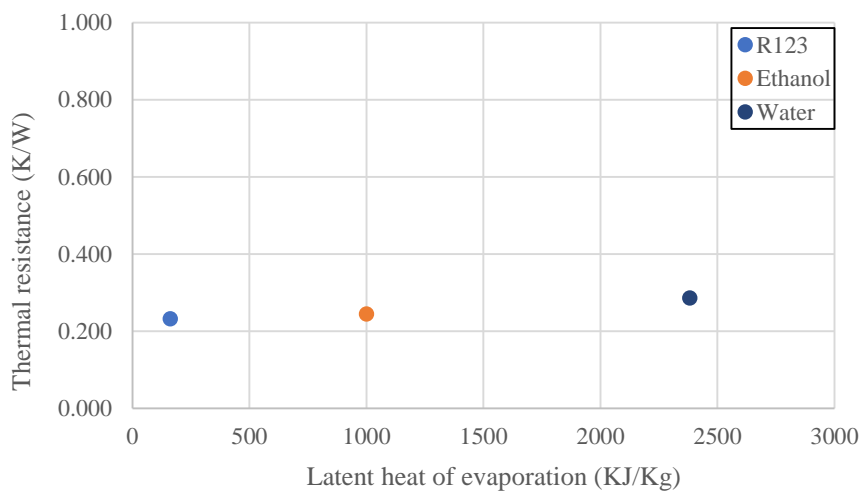
รูปที่ ๙.99 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



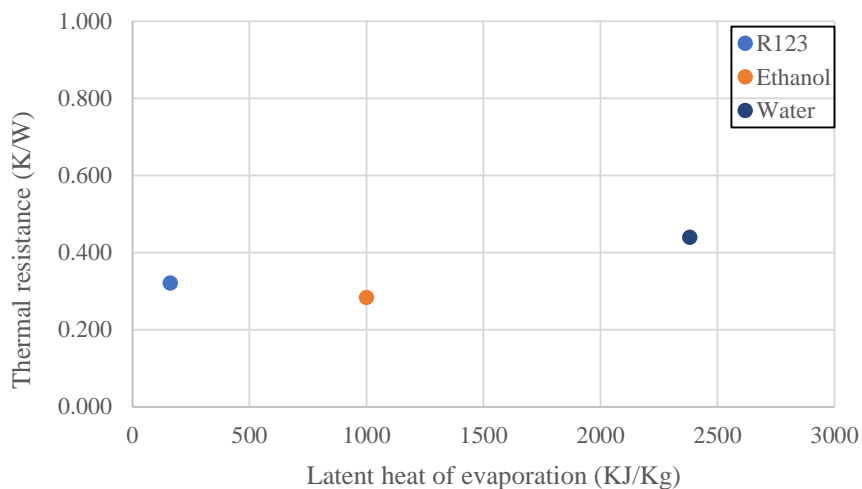
รูปที่ ๙.100 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



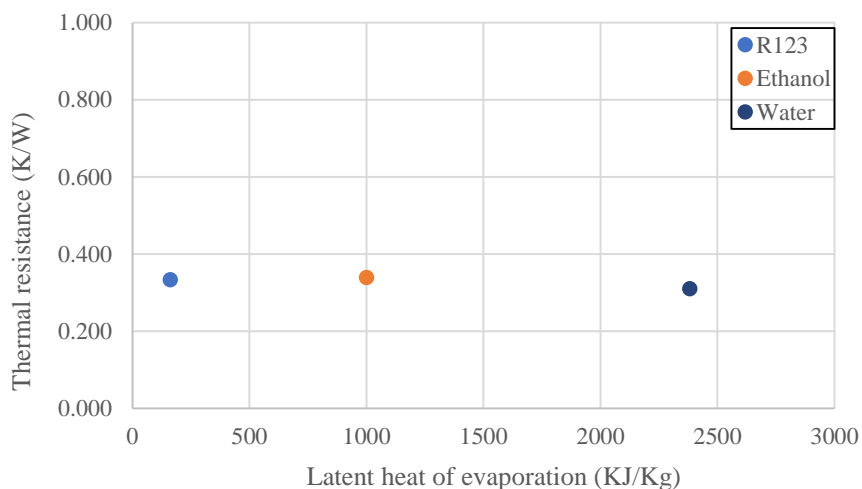
รูปที่ ฉ.101 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



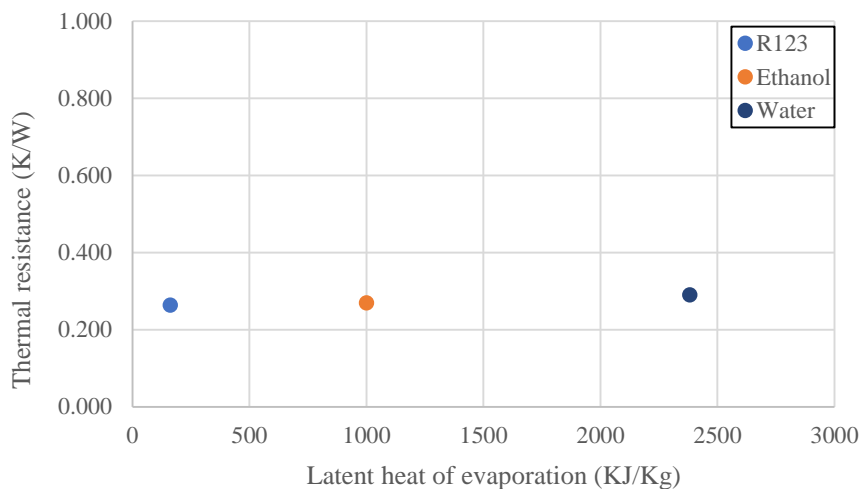
รูปที่ ฉ.102 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



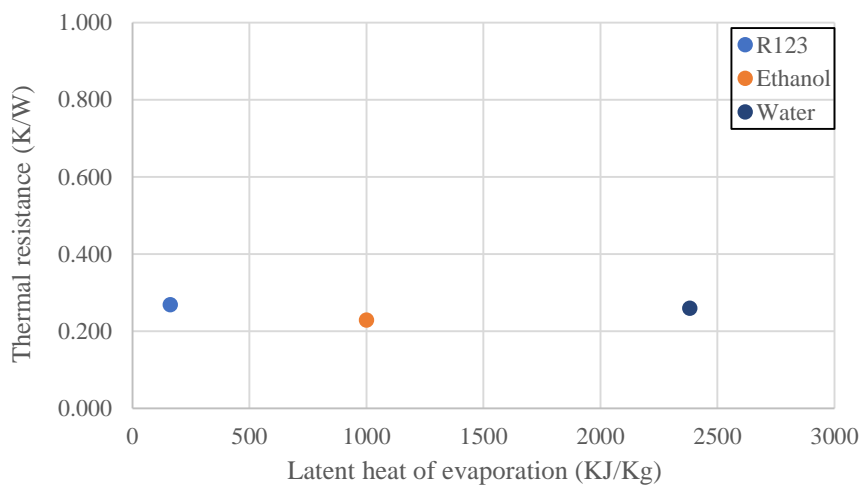
รูปที่ ๑.103 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
Le= 50 mm Di= 2.03 mm Turn= 40 turn (แนวนอน)



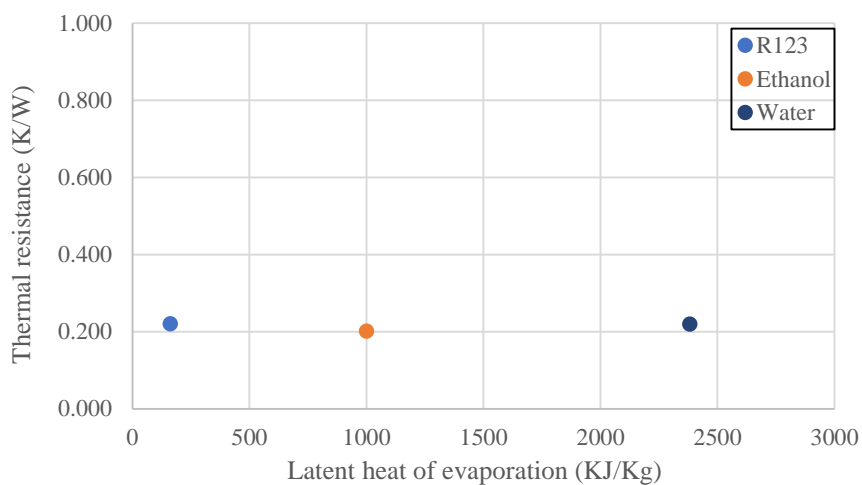
รูปที่ ๑.104 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
Le= 100 mm Di= 2.03 mm Turn= 40 turn (แนวนอน)



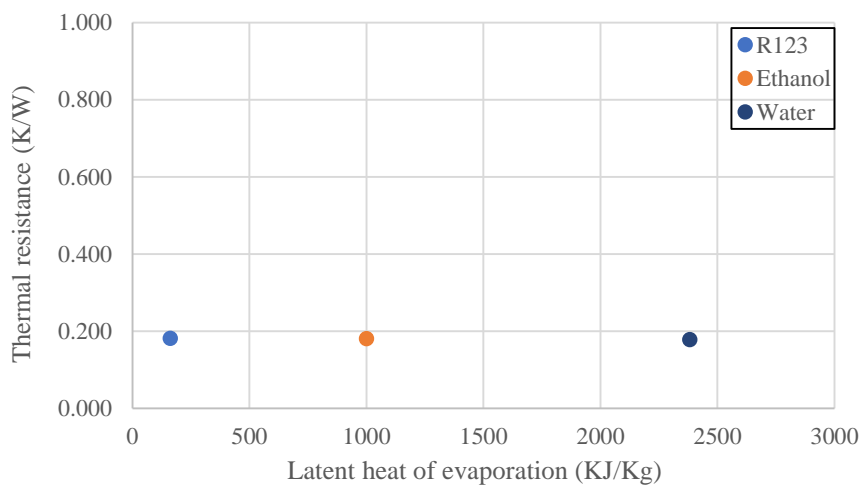
รูปที่ ฉ.105 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



รูปที่ ฉ.106 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)

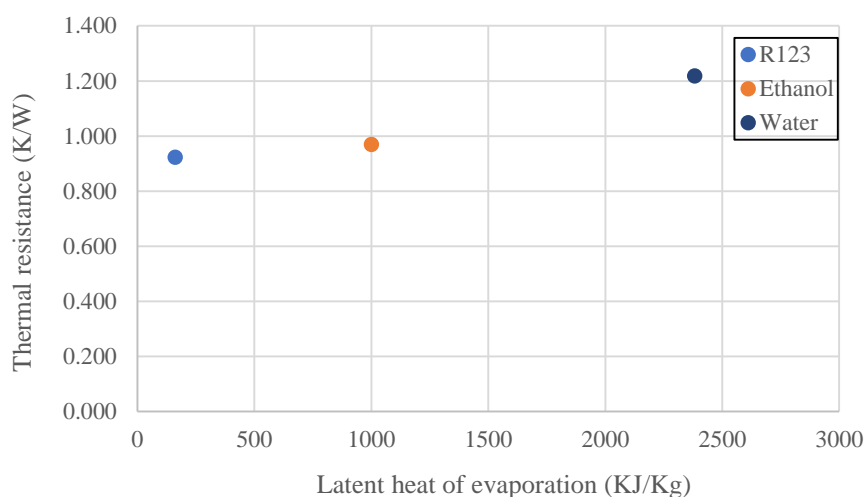


รูปที่ ฉ.107 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
Le= 100 mm Di= 2.03 mm Turn= 40 turn (แนวตั้ง)

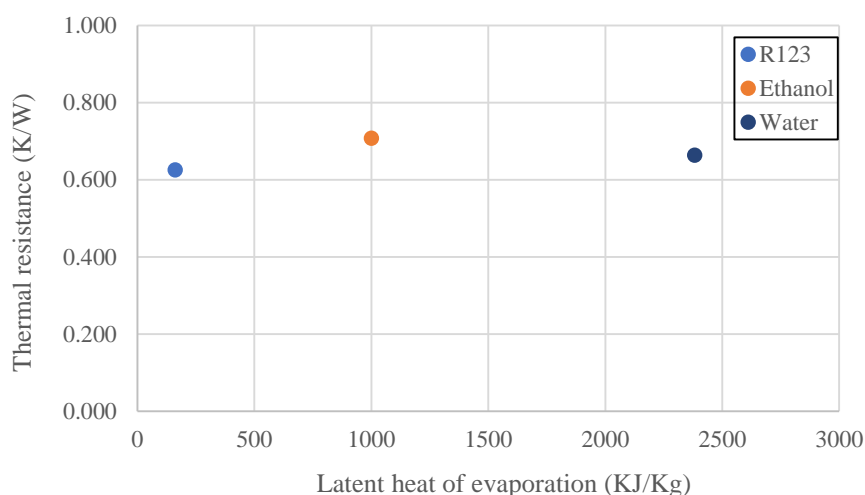


รูปที่ ฉ.108 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนทำระเหยโดยเป็น
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
Le= 150 mm Di= 2.03 mm Turn= 40 turn (แนวตั้ง)

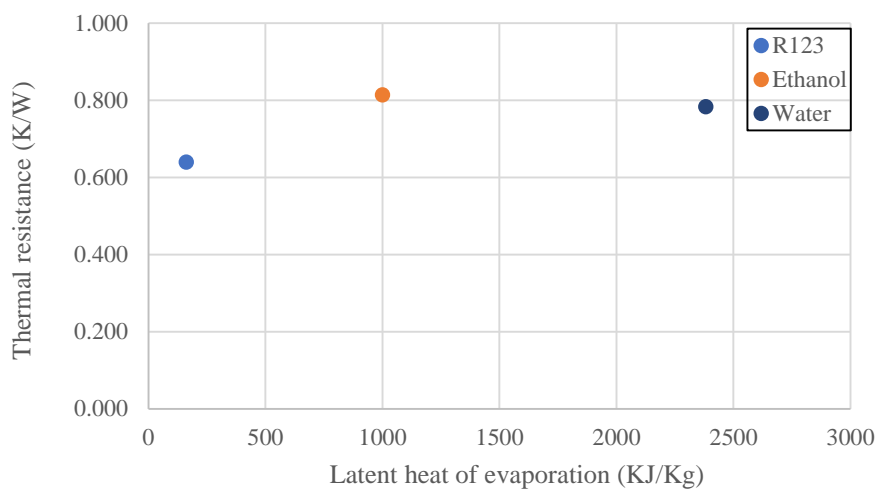
ผลของสารทำงานของการศึกษาผลกระทบของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อ ความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยแต่ละรูปจะแสดงความสัมพันธ์ของ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของแต่ละสารทำงานกับค่าความต้านทานความร้อน ทั้งการวางชุด ทดลองในแนวนอนและแนวตั้ง



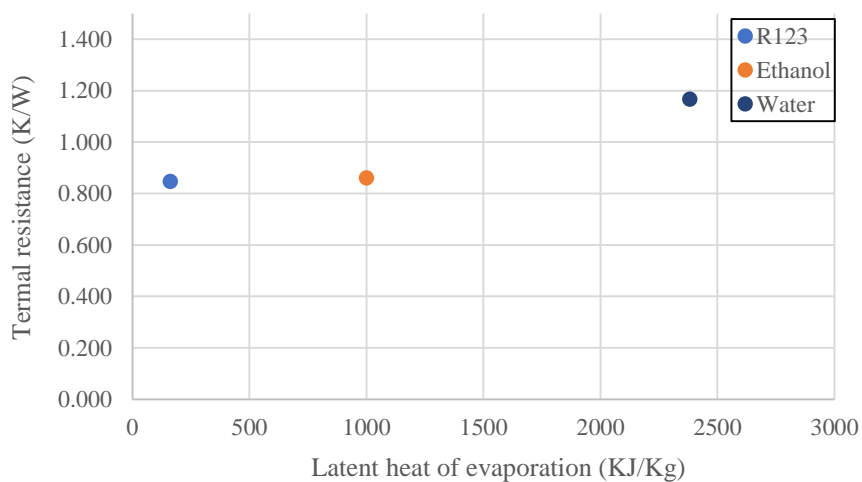
รูปที่ ฉ.109 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



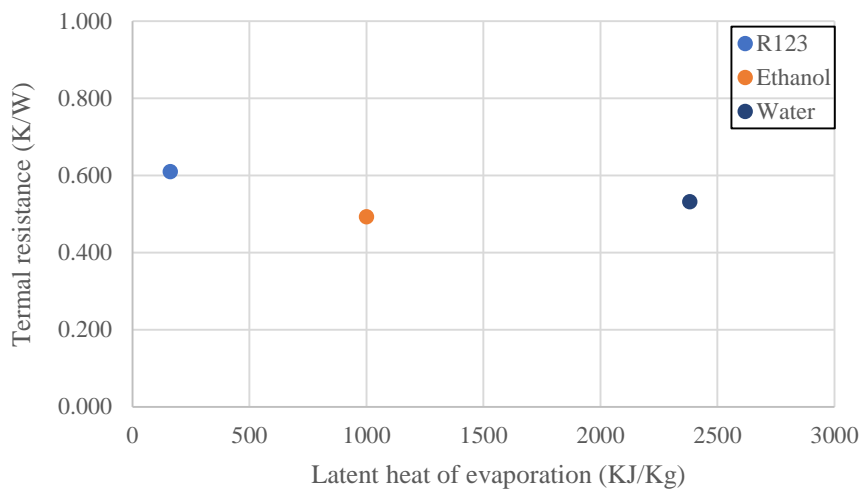
รูปที่ ฉ.110 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



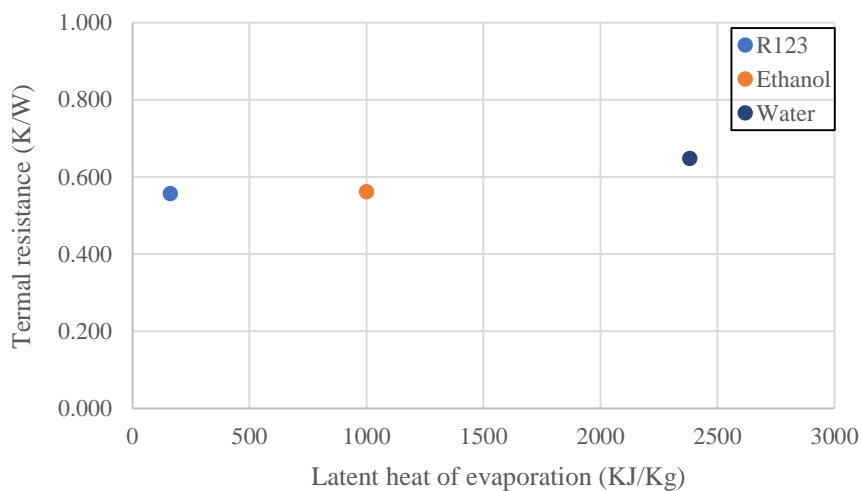
รูปที่ ฉ.111 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



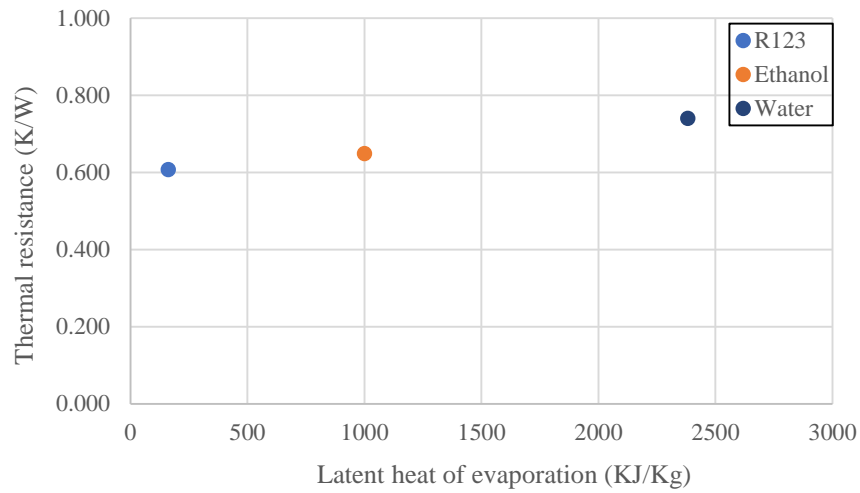
รูปที่ ฉ.112 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



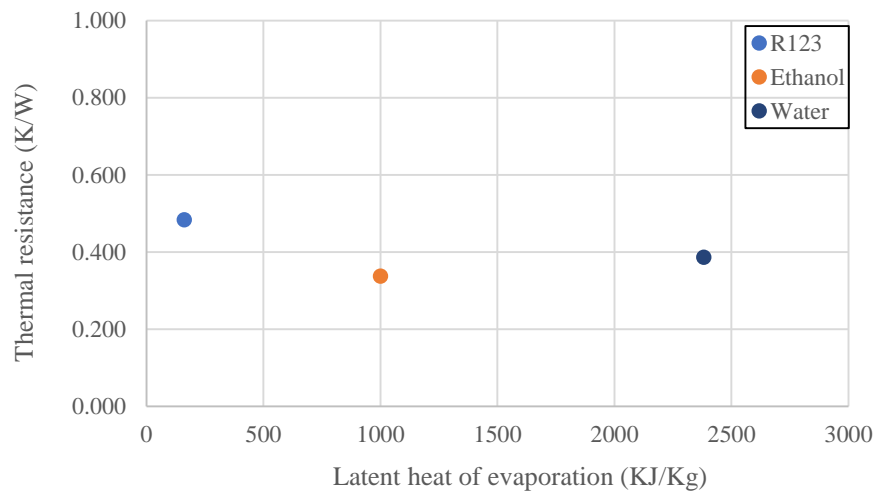
รูปที่ ฉ.113 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



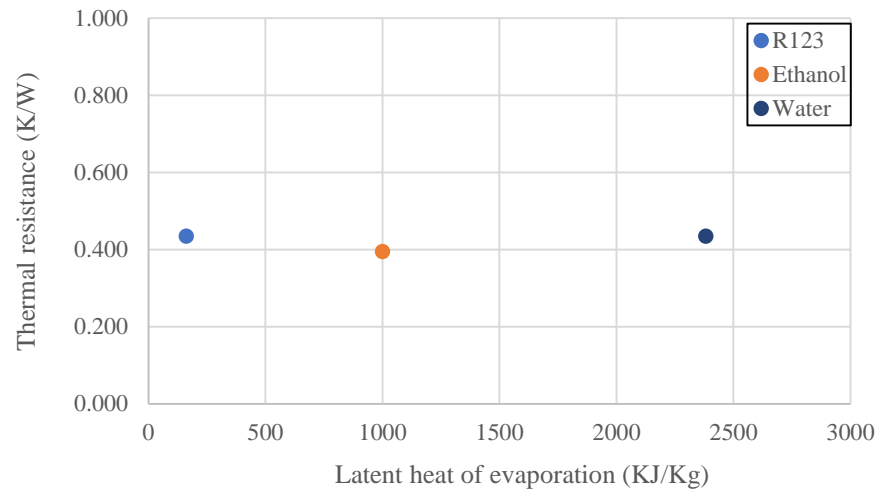
รูปที่ ฉ.114 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



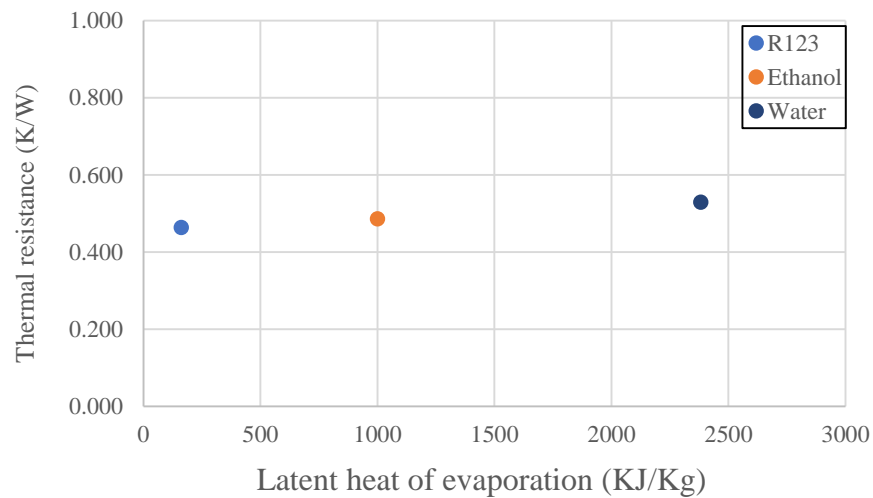
รูปที่ ฉ.115 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



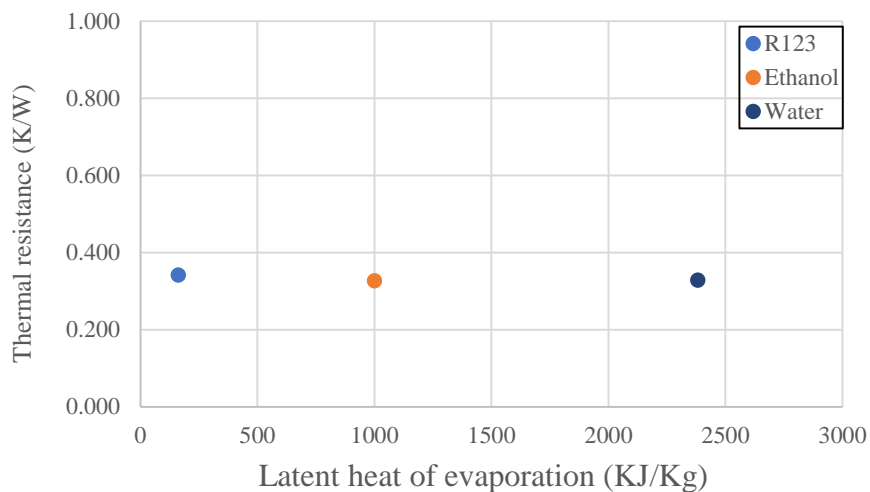
รูปที่ ฉ.116 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



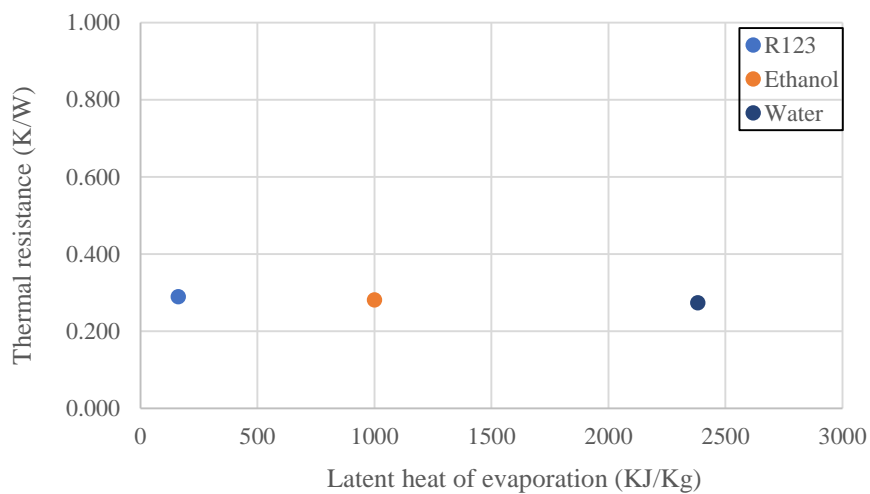
รูปที่ ฉ.117 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



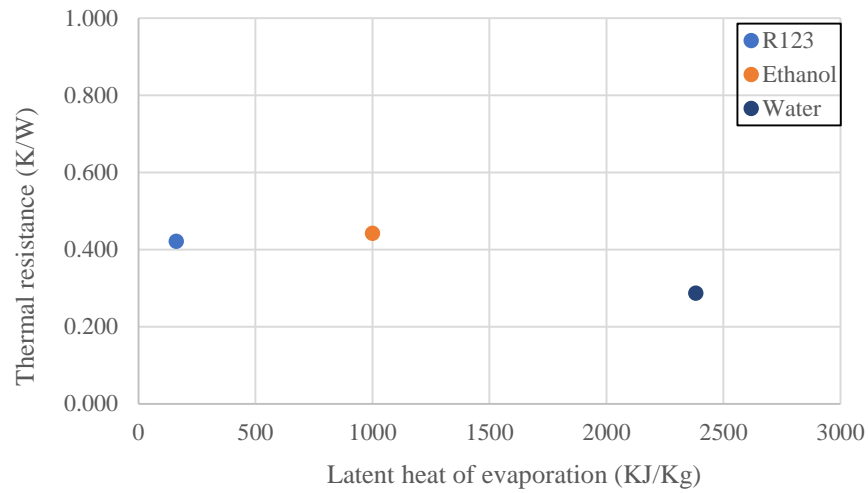
รูปที่ ฉ.118 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



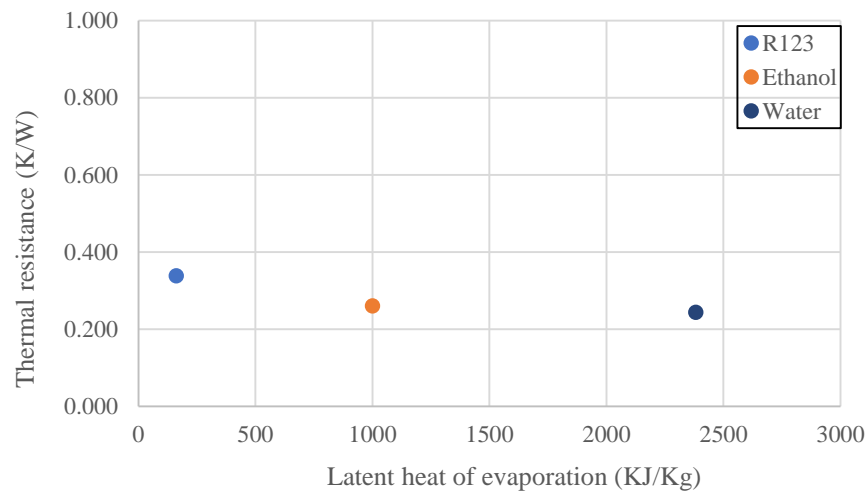
รูปที่ ฉ.119 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



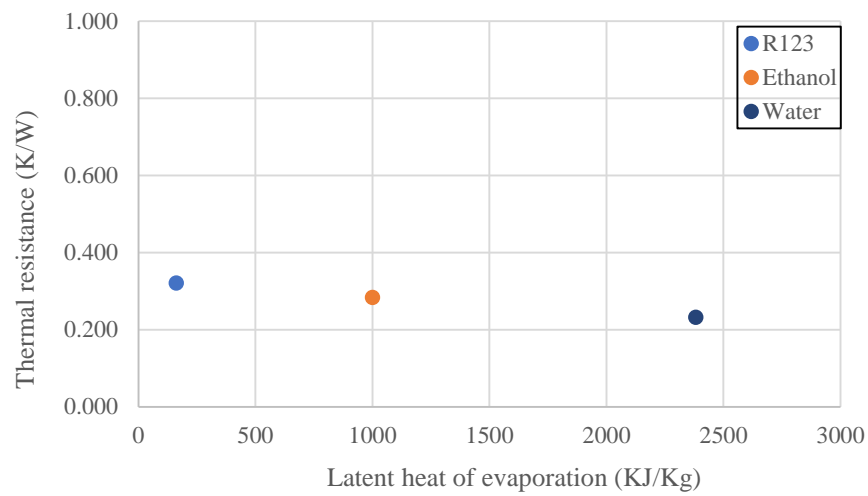
รูปที่ ฉ.120 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



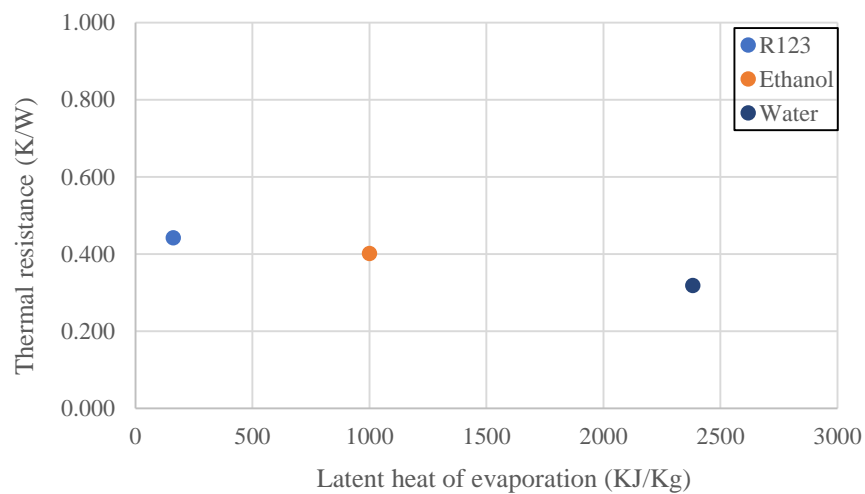
รูปที่ ฉ.121 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



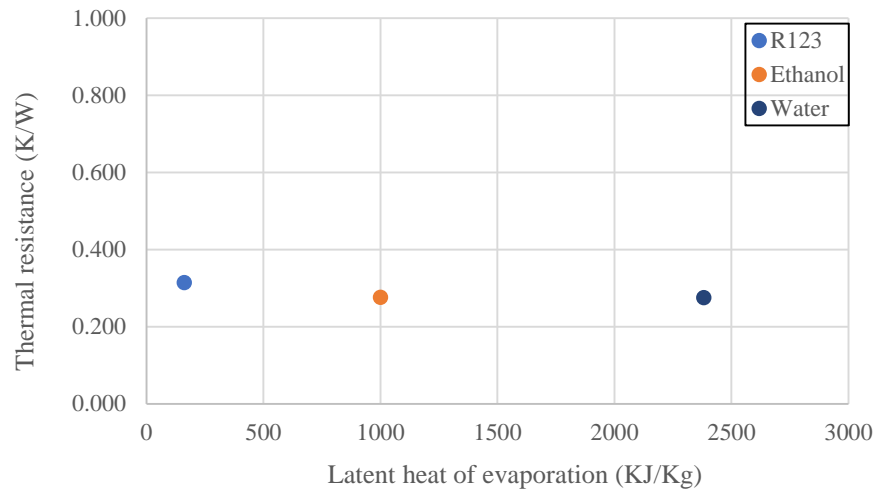
รูปที่ ฉ.122 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



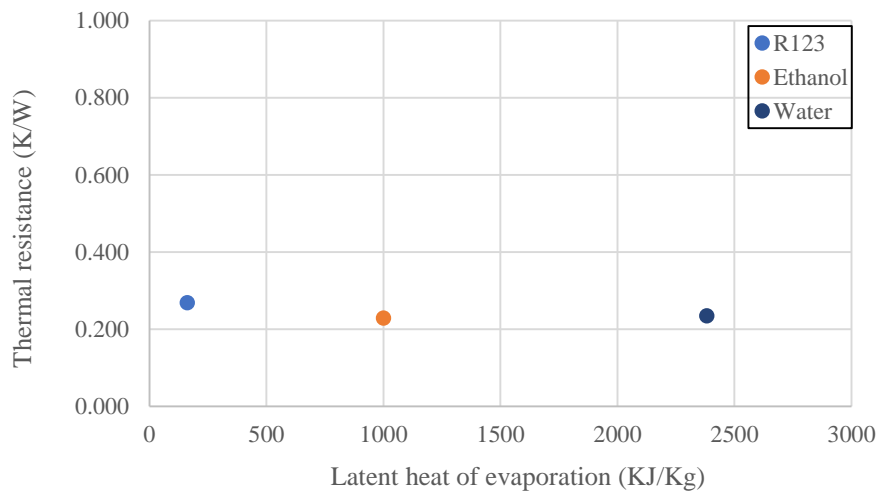
รูปที่ ฉ.123 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



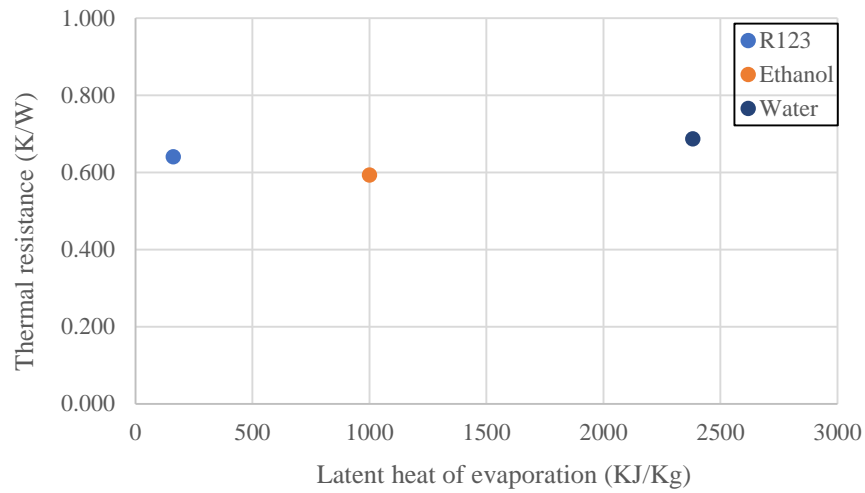
รูปที่ ฉ.124 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



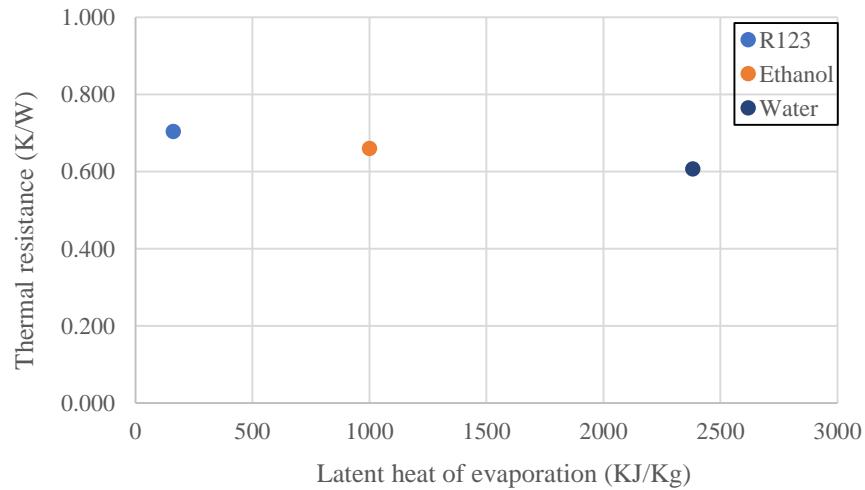
รูปที่ ฉ.125 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



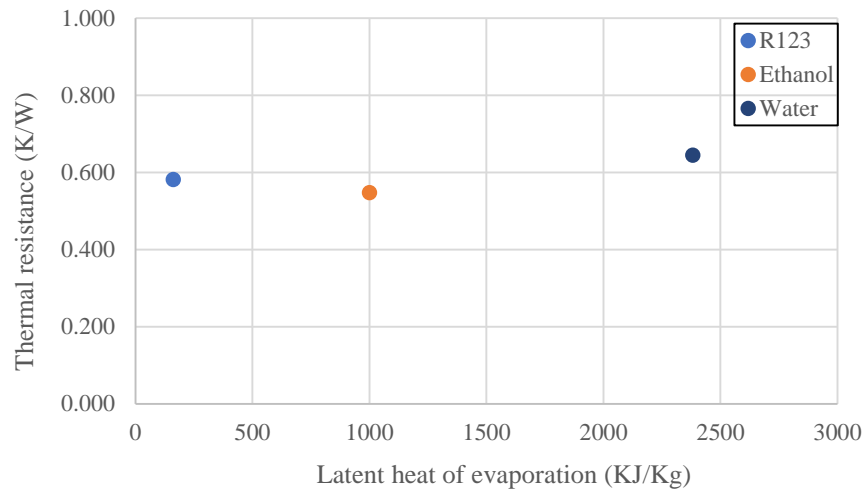
รูปที่ ฉ.126 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 50 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



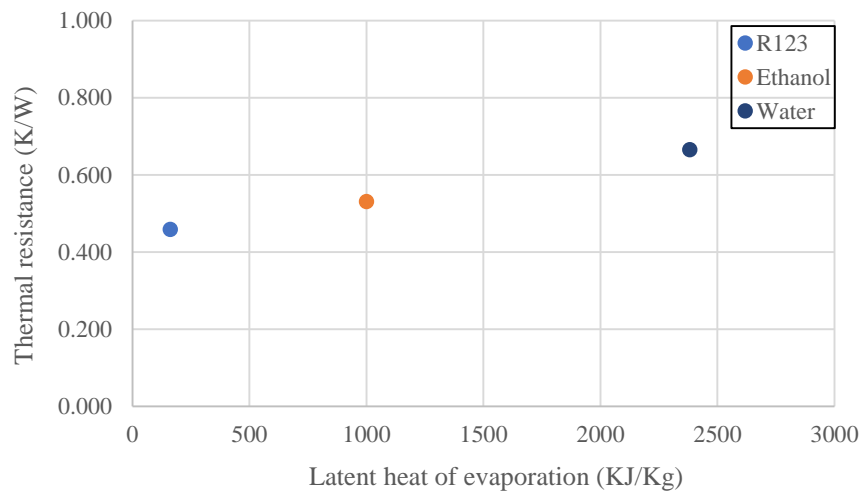
รูปที่ ฉ.127 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



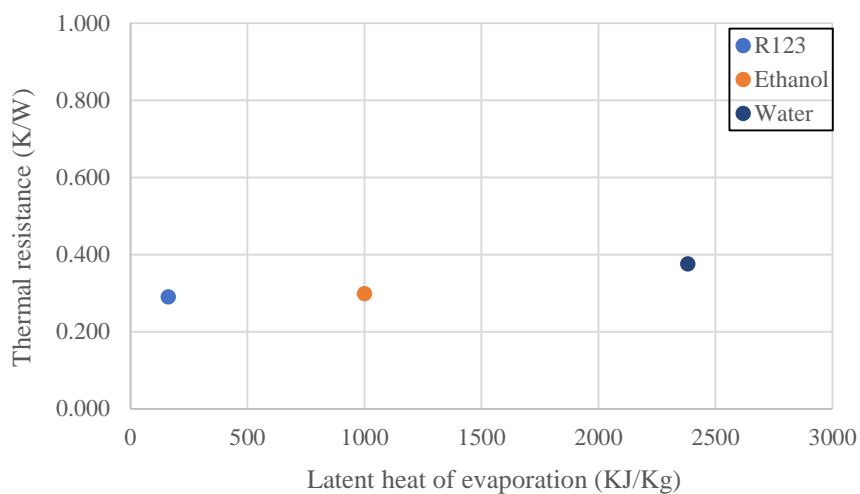
รูปที่ ฉ.128 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



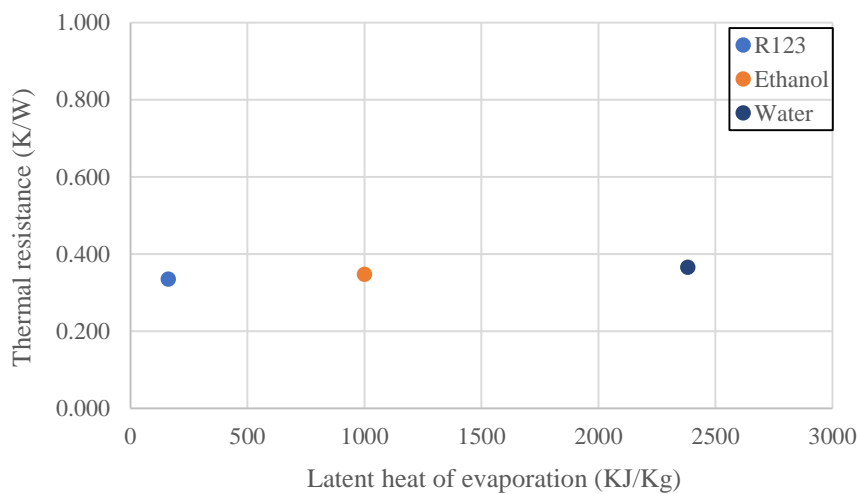
รูปที่ ฉ.129 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



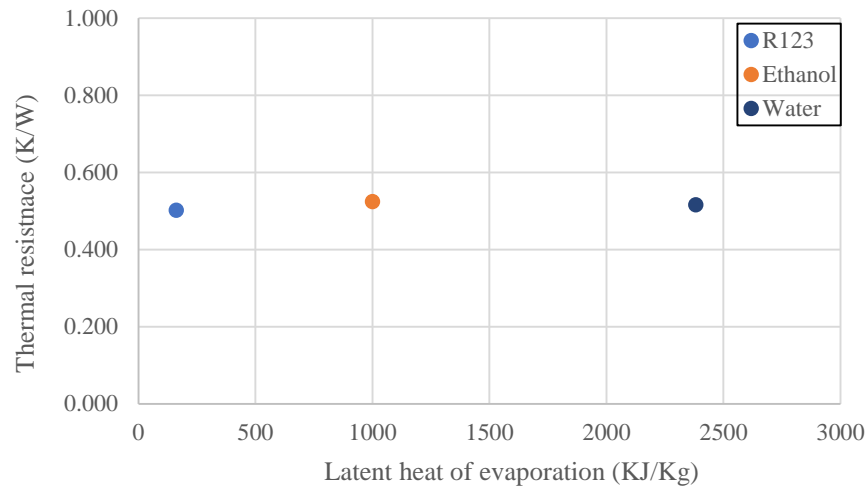
รูปที่ ฉ.130 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



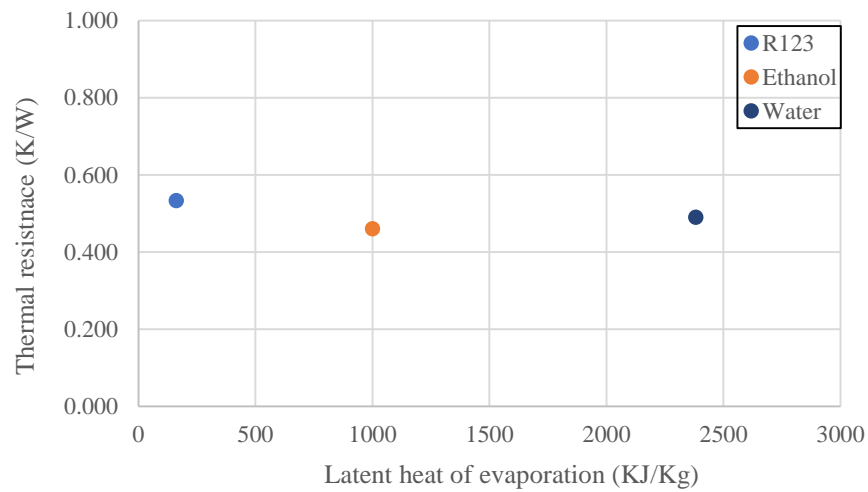
รูปที่ ฉ.131 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



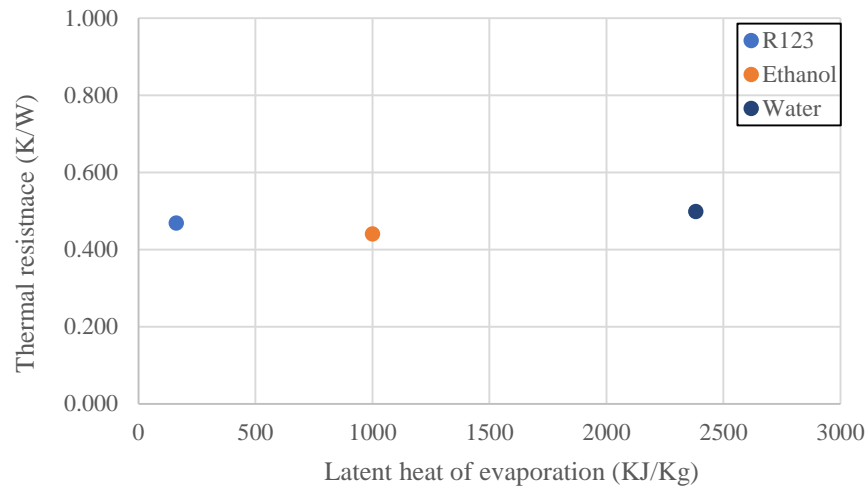
รูปที่ ฉ.132 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



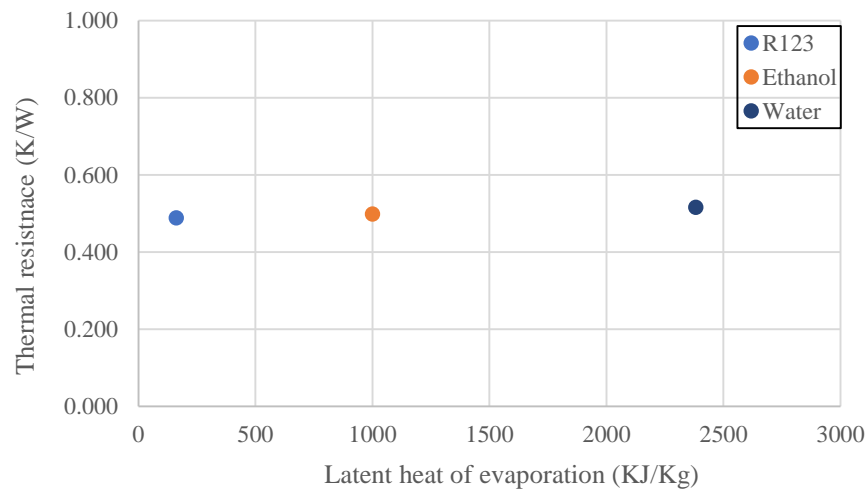
รูปที่ ฉ.133 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุด
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



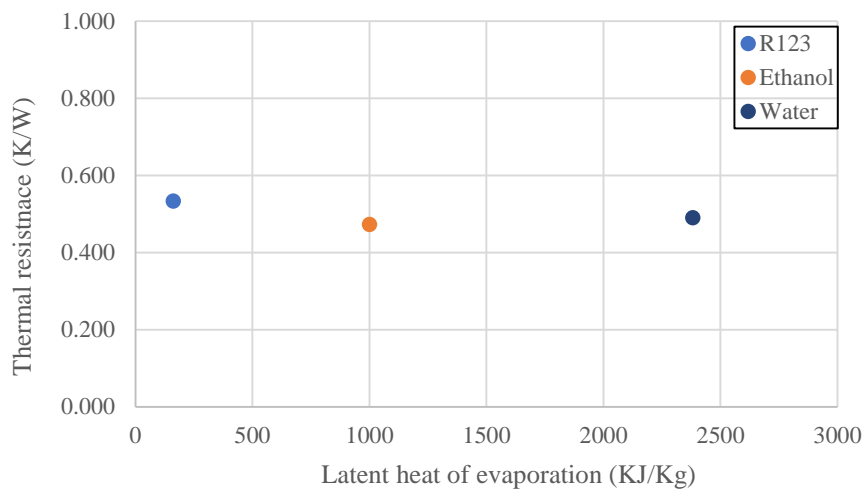
รูปที่ ฉ.134 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



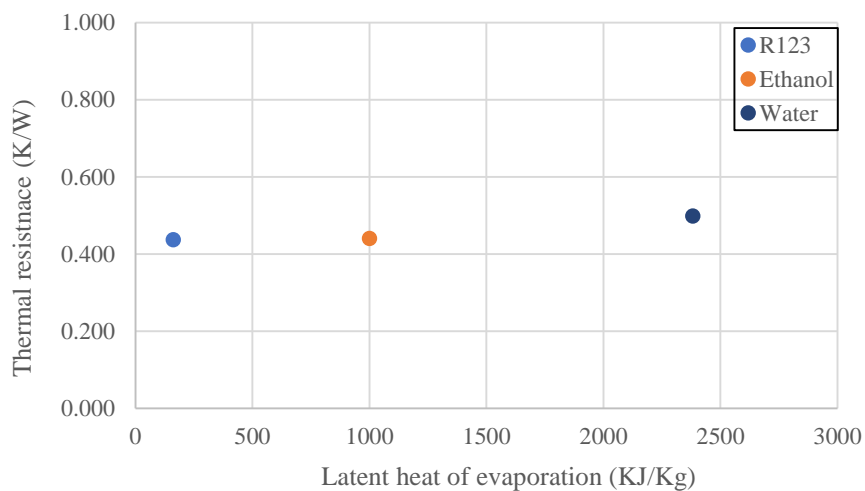
รูปที่ ฉ.135 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



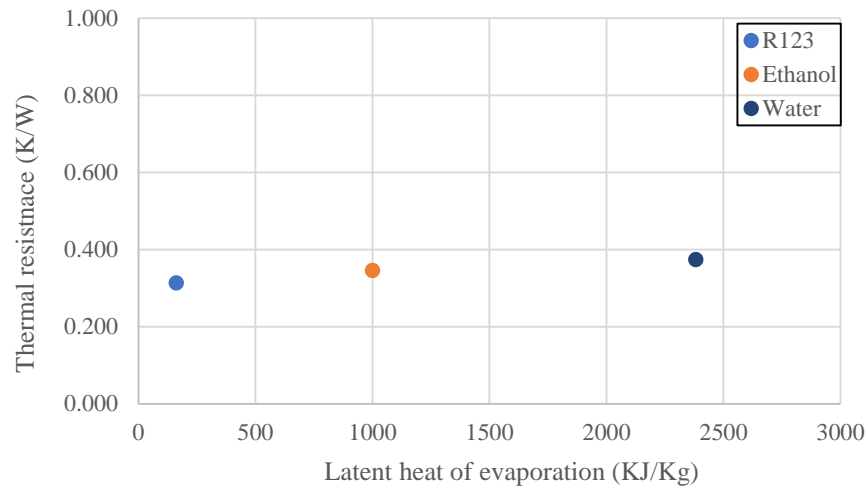
รูปที่ ฉ.136 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



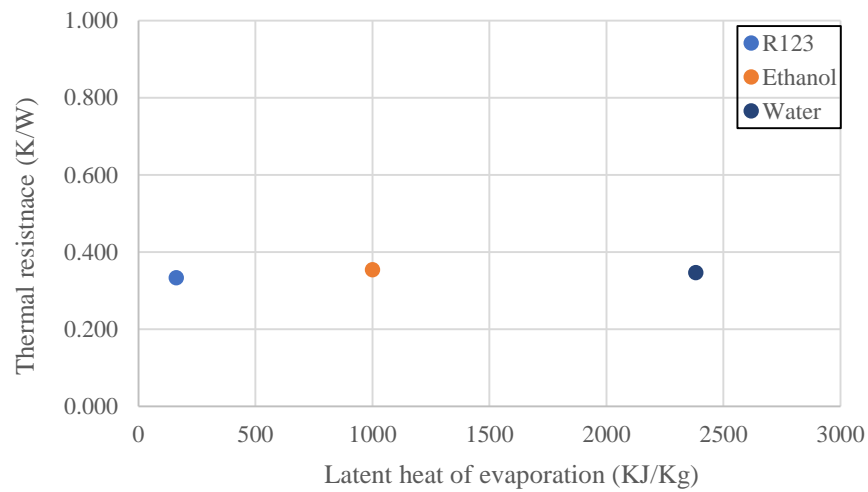
รูปที่ ฉ.137 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



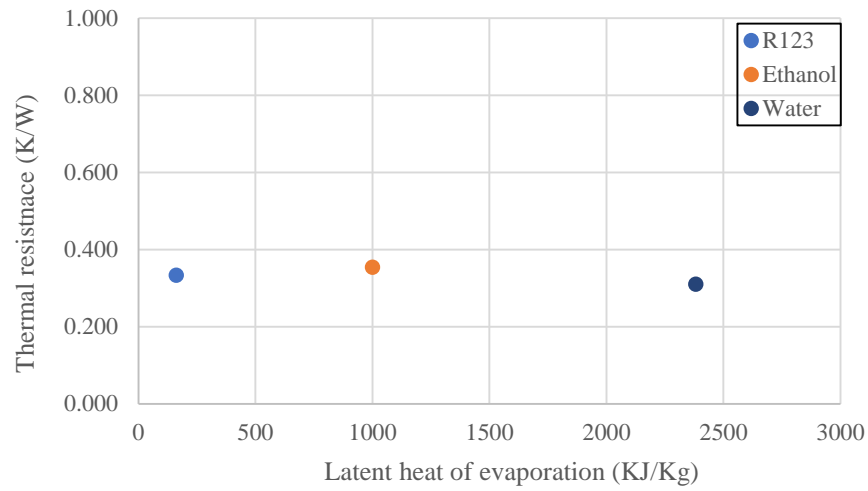
รูปที่ ฉ.138 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



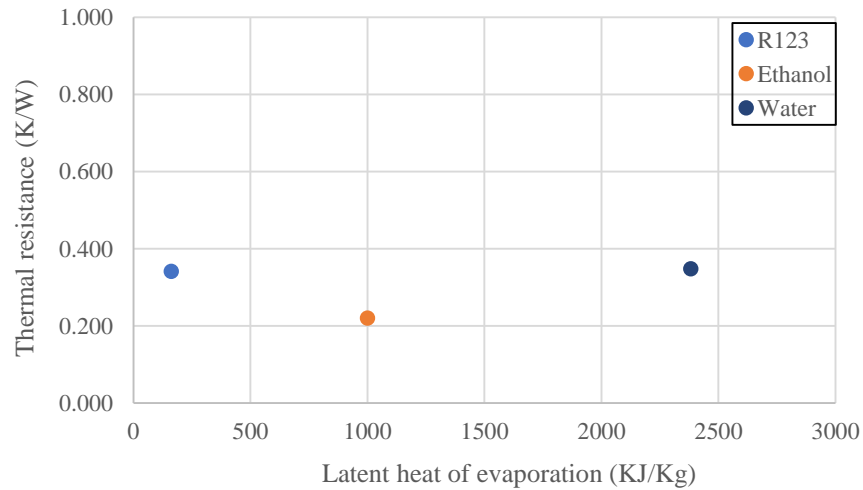
รูปที่ ฉ.139 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวนอน)



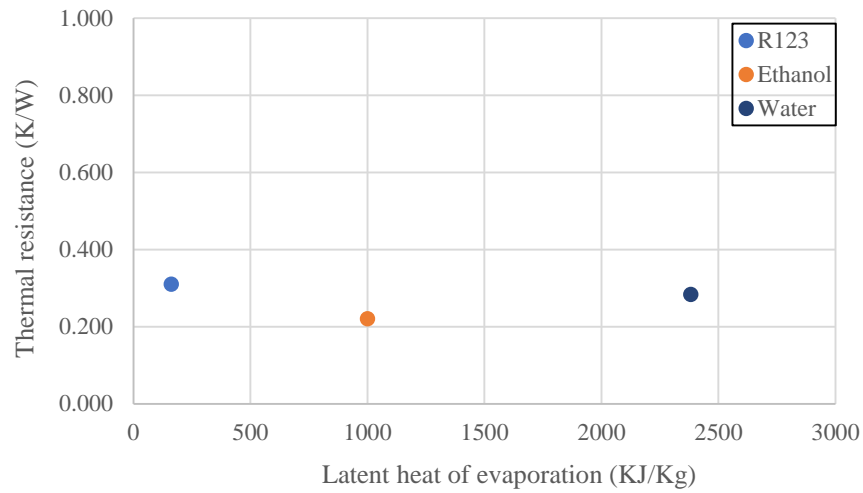
รูปที่ ฉ.140 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 32 \text{ turn}$ (แนวนอน)



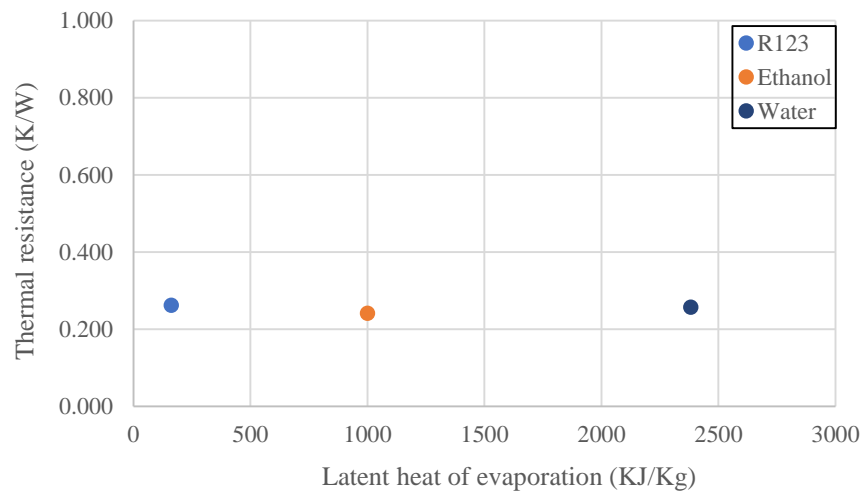
รูปที่ ฉ.141 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 40 \text{ turn}$ (แนวนอน)



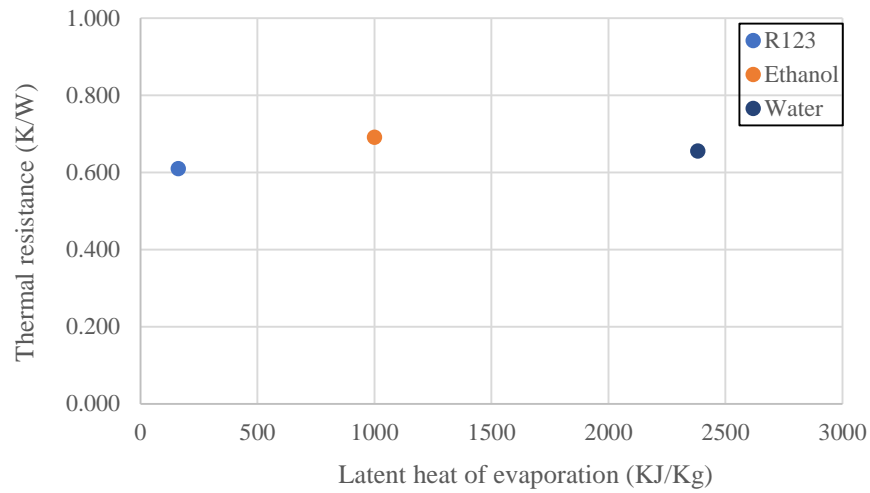
รูปที่ ฉ.142 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ $Turn = 16 \text{ turn}$ (แนวตั้ง)



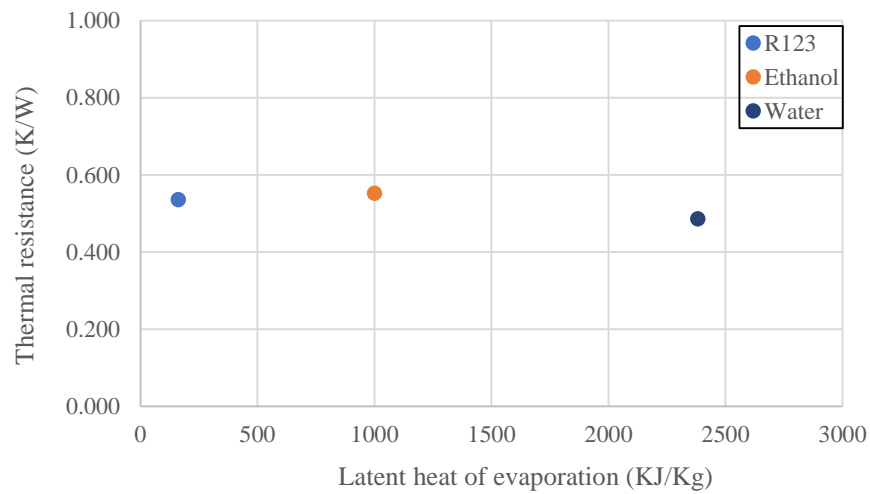
รูปที่ ฉ.143 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยงโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



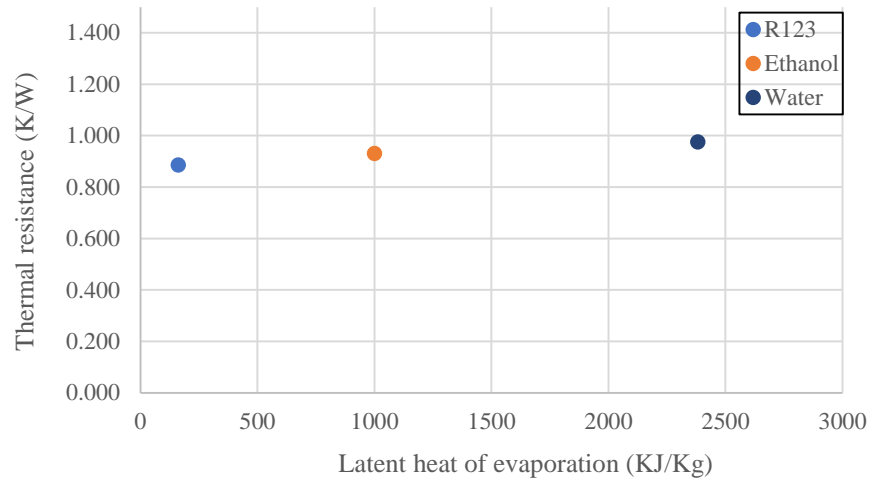
รูปที่ ฉ.144 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยงโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 100 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



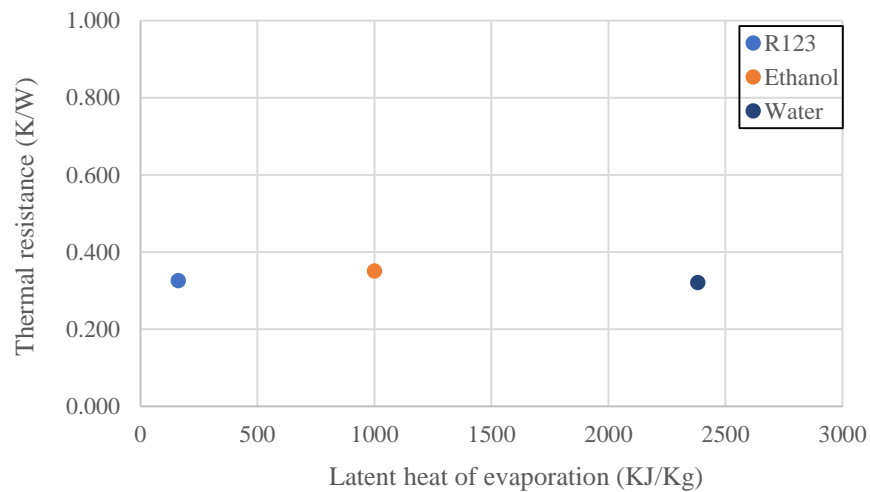
รูปที่ ฉ.145 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



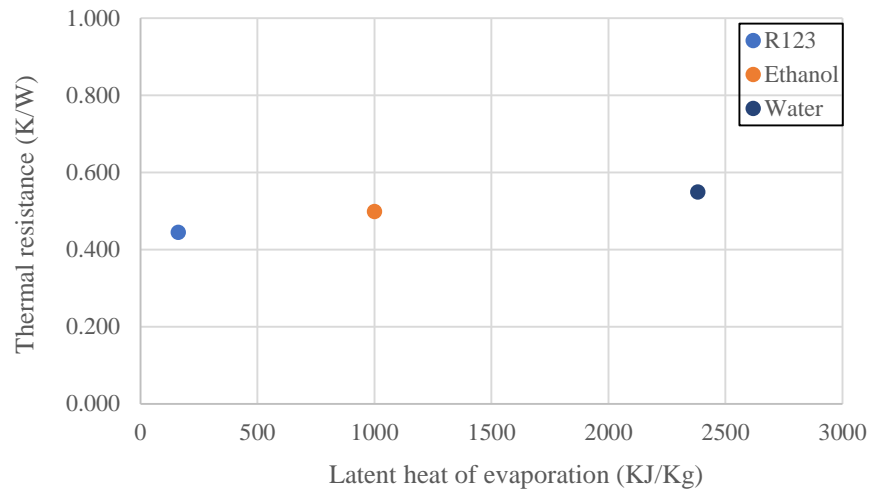
รูปที่ ฉ.146 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



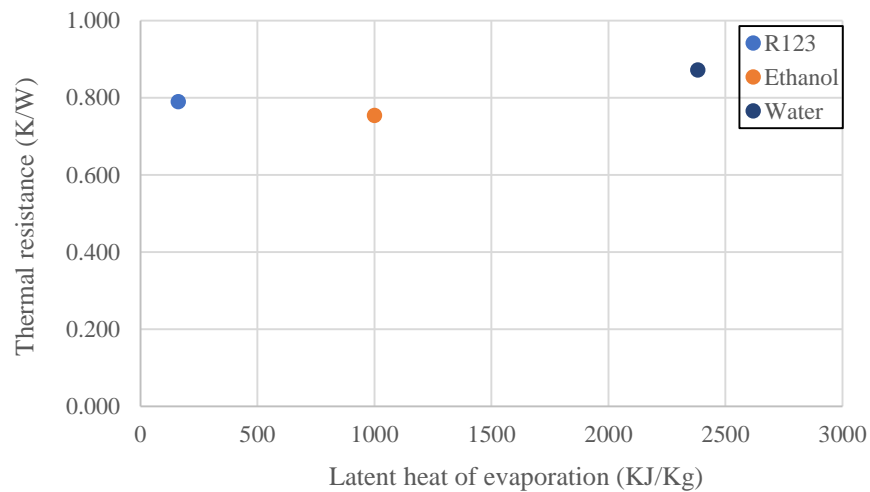
รูปที่ ๑.147 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



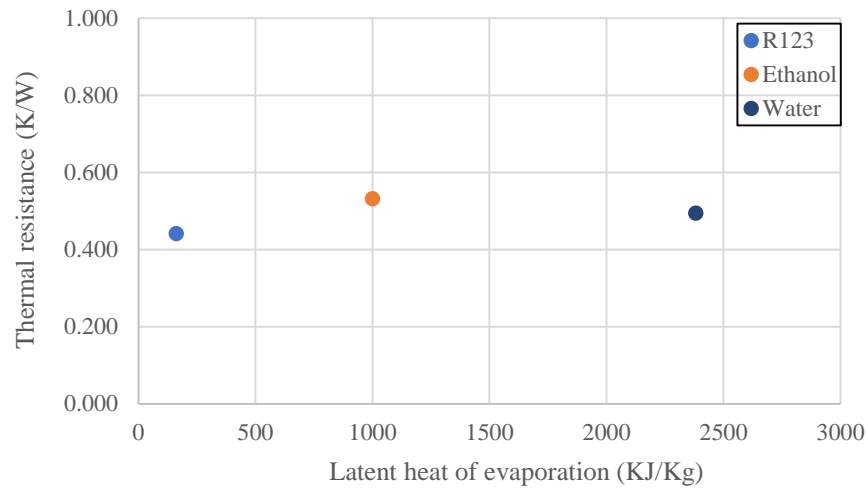
รูปที่ ๑.148 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



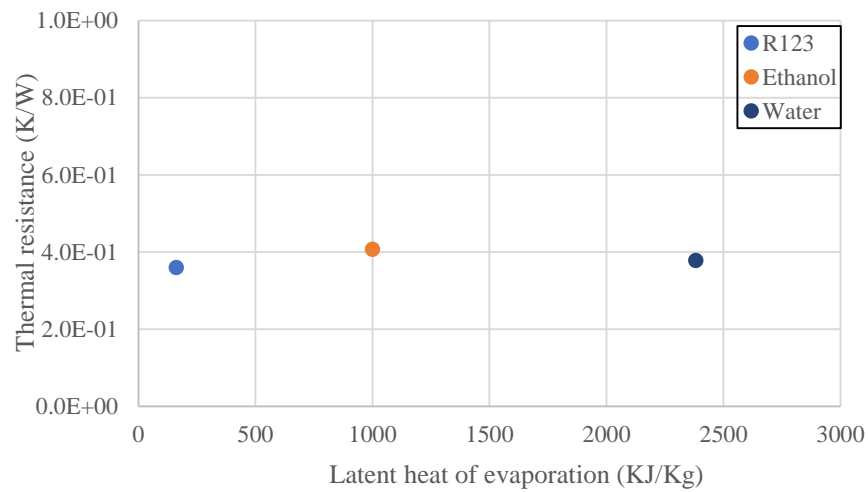
รูปที่ ฉ.149 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



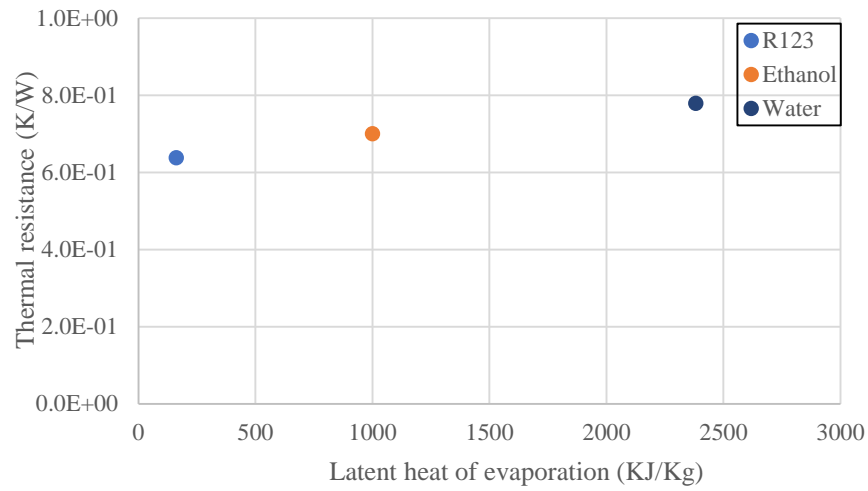
รูปที่ ฉ.150 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.0 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



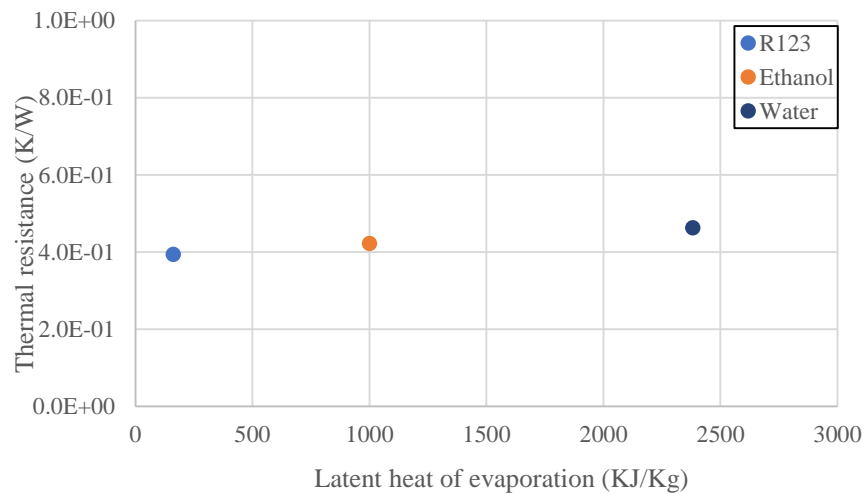
รูปที่ ฉ.151 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



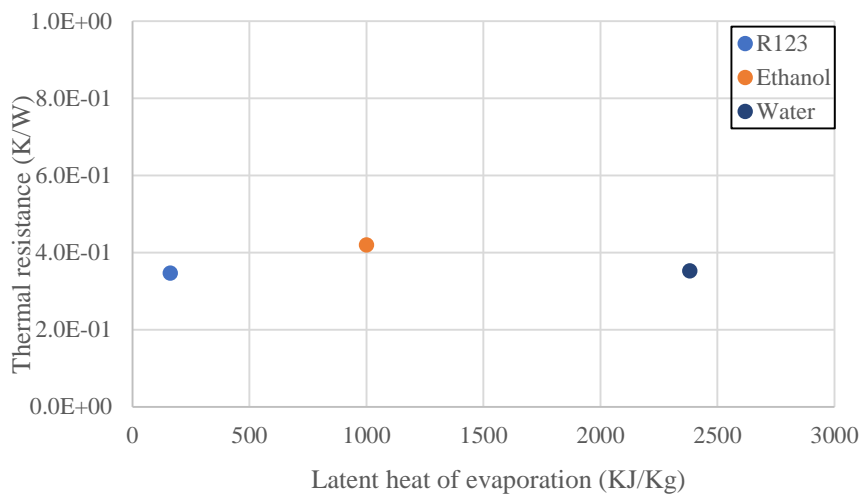
รูปที่ ฉ.152 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



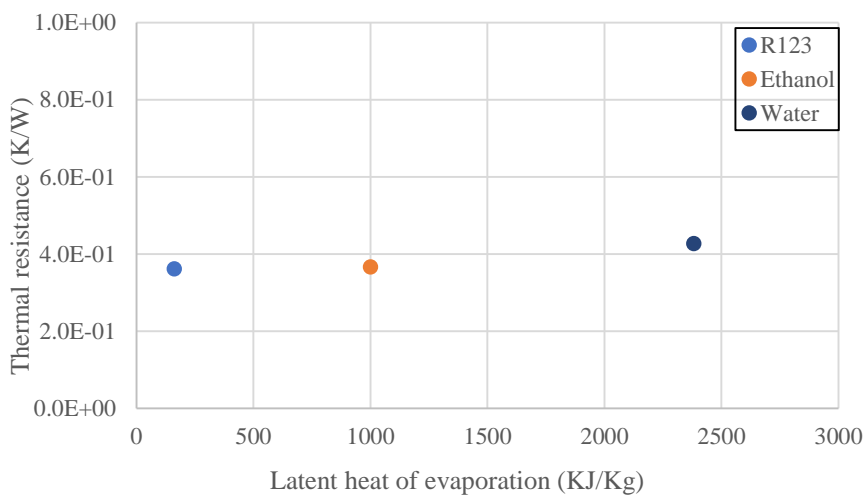
รูปที่ ๑.153 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



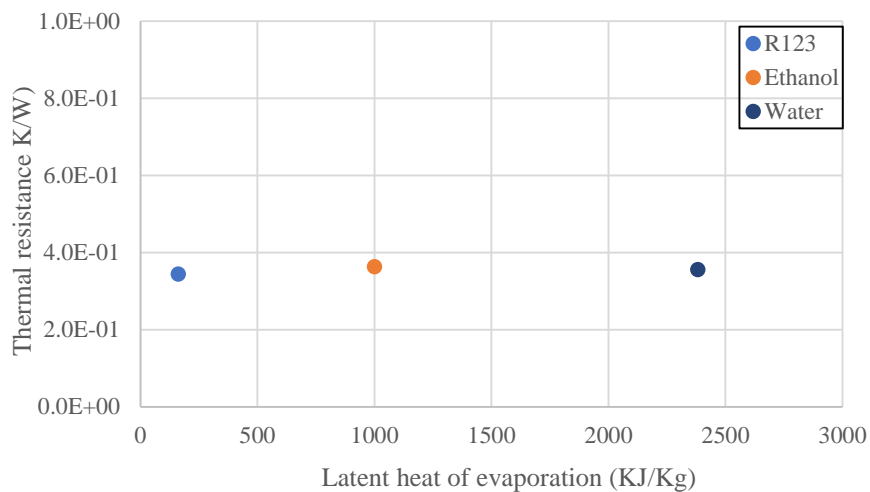
รูปที่ ๑.154 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



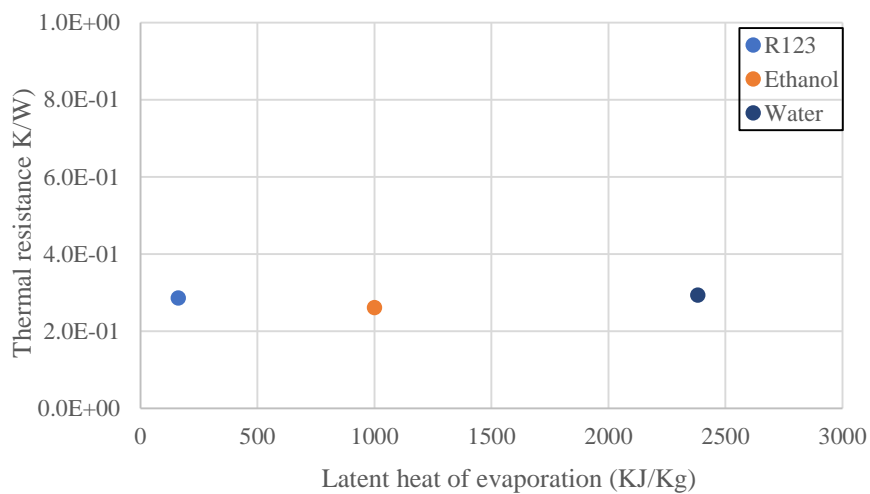
รูปที่ ฉ.155 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยงโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)



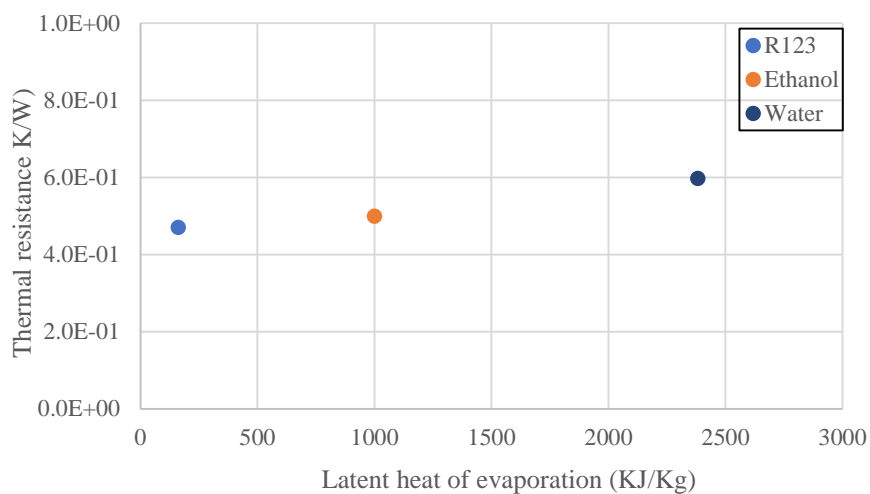
รูปที่ ฉ.156 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยงโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 1.5 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวตั้ง)



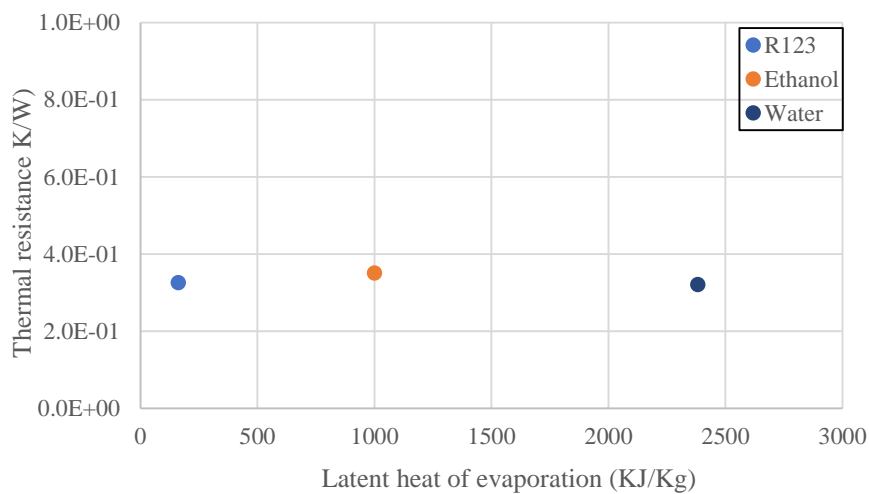
รูปที่ ฉ.157 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวนอน)



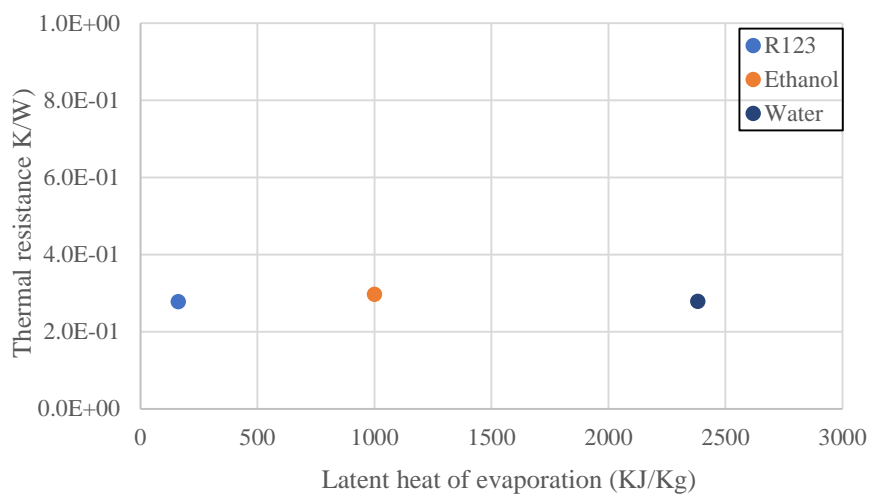
รูปที่ ฉ.158 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวนอน)



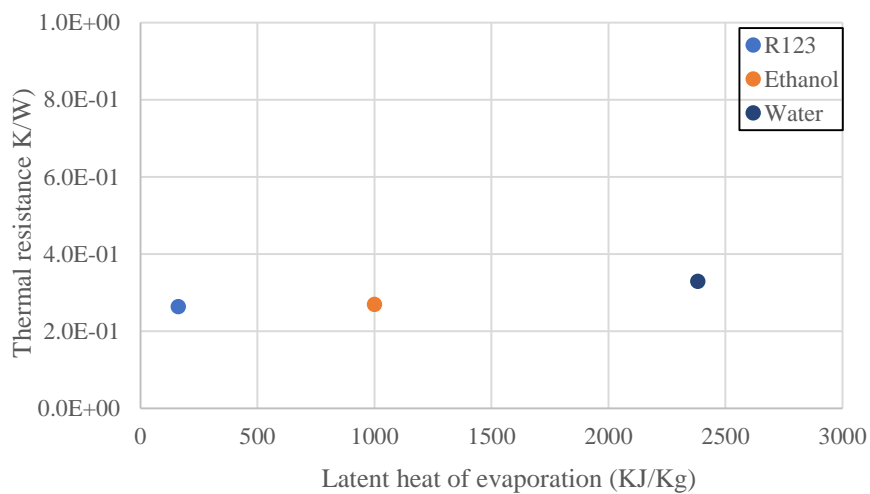
รูปที่ ฉ.159 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 40 turn (แนวนอน)



รูปที่ ฉ.160 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเฉลี่ยโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 16 turn (แนวตั้ง)



รูปที่ ฉ.161 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)

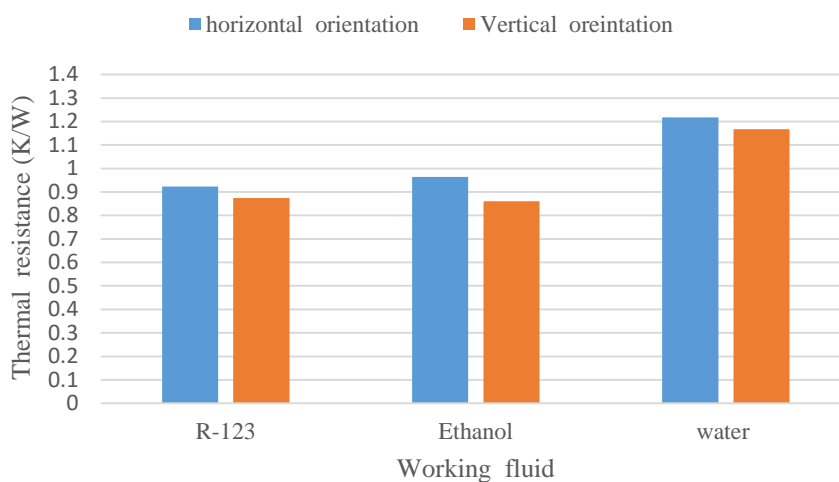


รูปที่ ฉ.162 แสดงผลของสารทำงานของการเปลี่ยนแปลงจำนวนโค้งเลี้ยวโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอกับค่าความต้านทานความร้อนของชุดทดลอง
 $Le = 150 \text{ mm}$ $Di = 2.03 \text{ mm}$ Turn = 32 turn (แนวตั้ง)

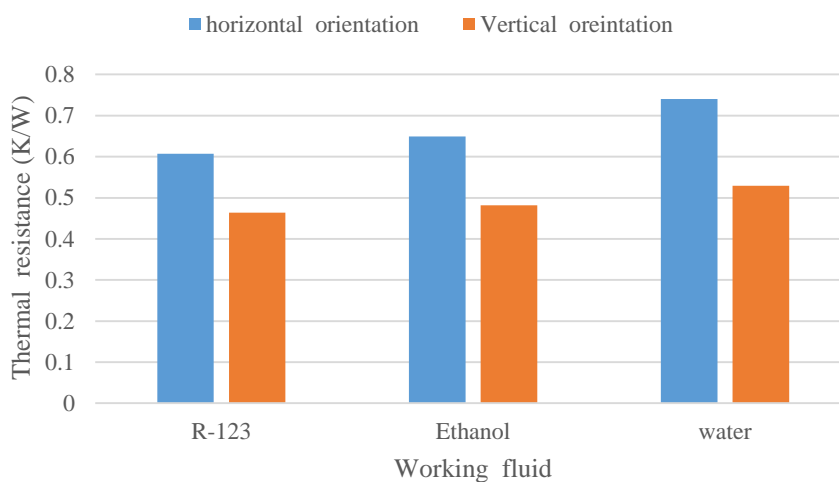


ภาคผนวก ข.

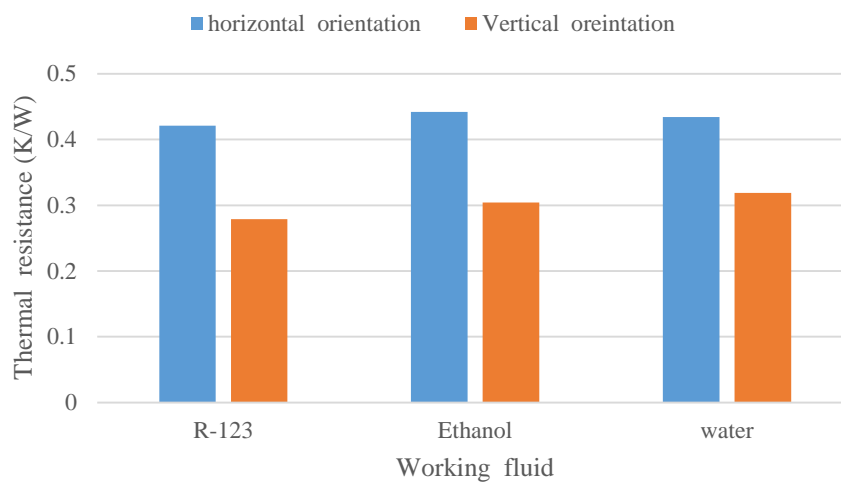
แสดงผลของวางแผนชุดทดลองระหว่างแนวตั้งและแนวนอนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนแบบสั้น
วงรอบที่มีแหล่งรับความร้อนสองแหล่ง โดยชุดทดลองมีทั้งหมด 27 ชุดทดลอง ดังนี้



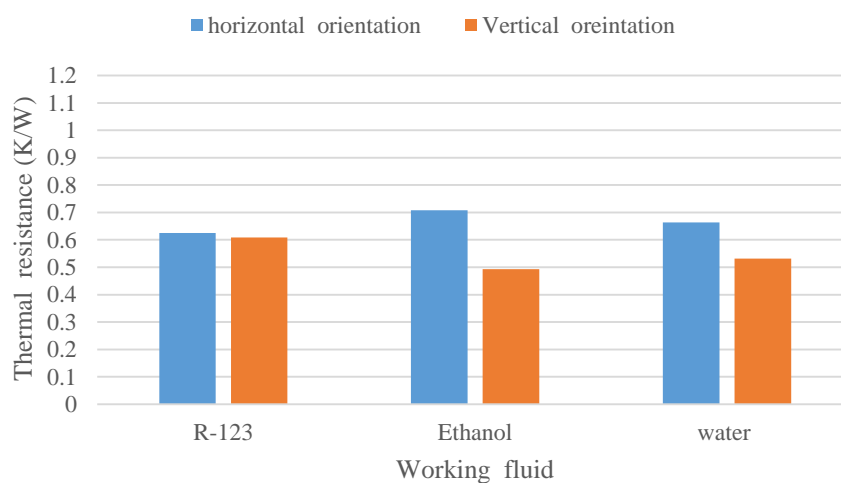
รูปที่ ข.1 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



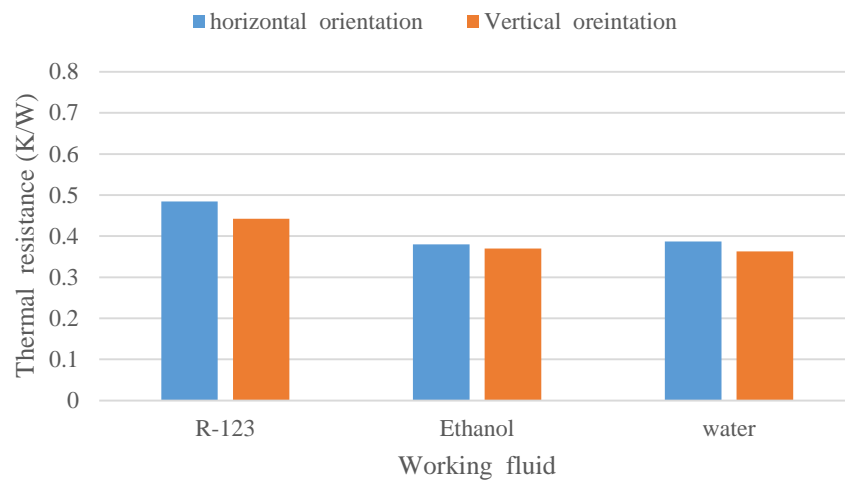
รูปที่ ข.2 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



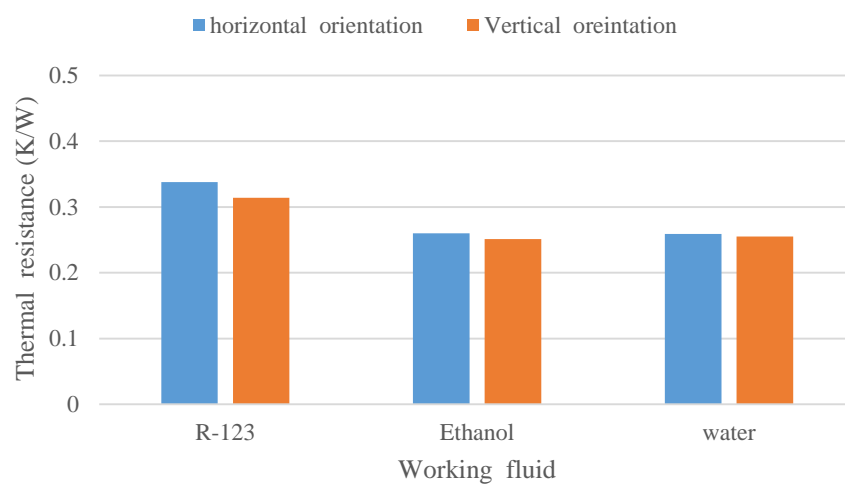
รูปที่ ช.3 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



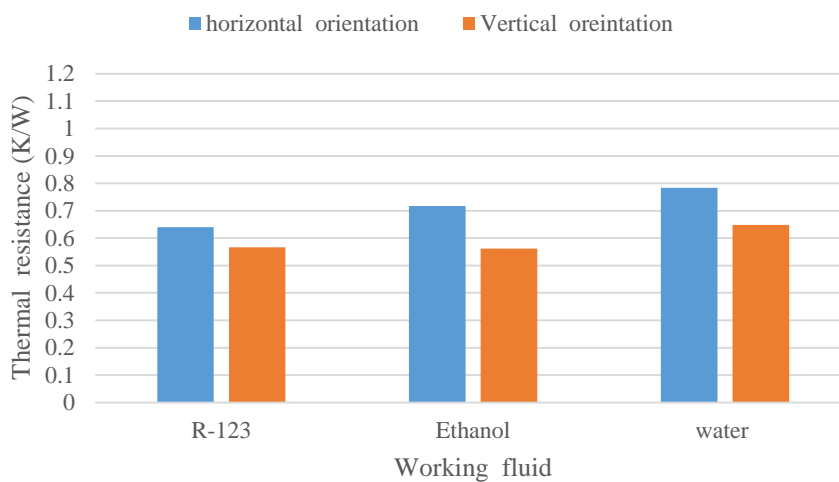
รูปที่ ช.4 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



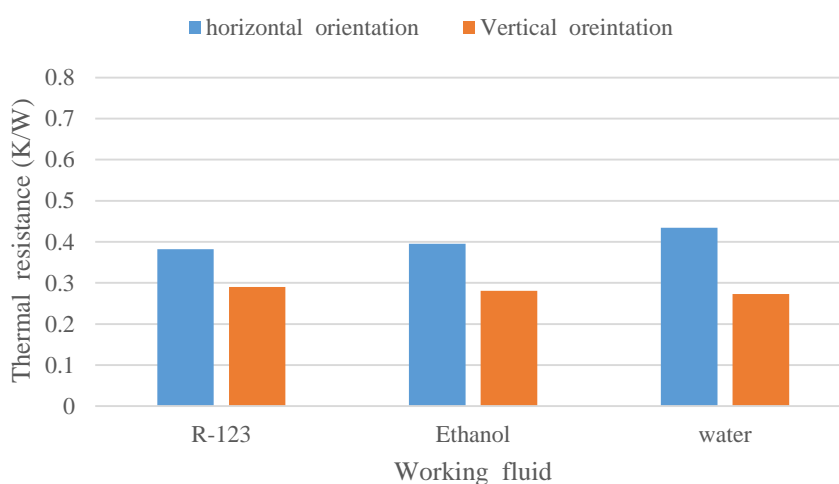
รูปที่ ๕.5 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



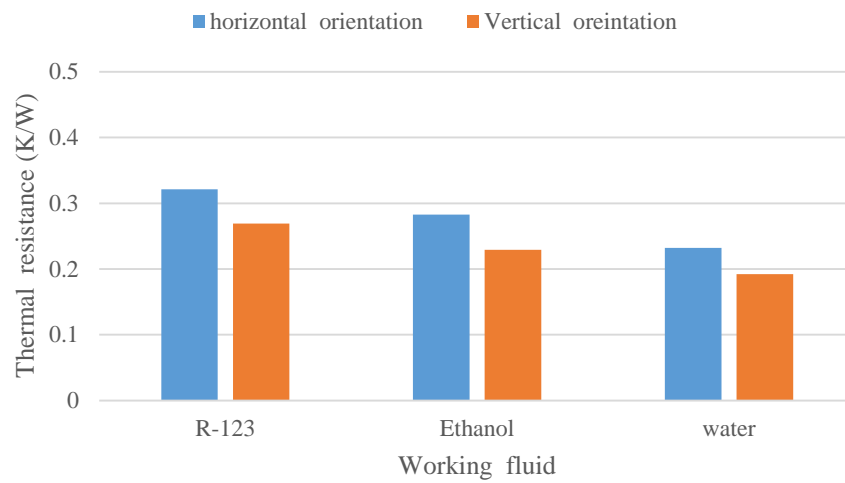
รูปที่ ๕.6 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



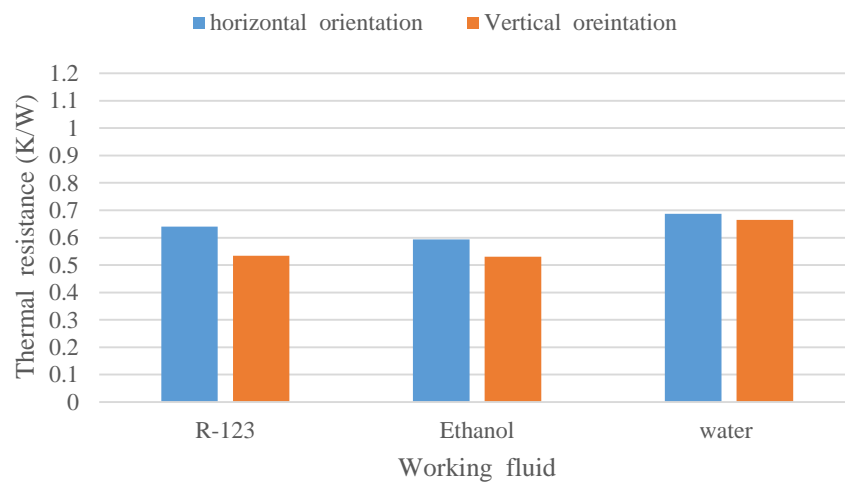
รูปที่ ๗.๗ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



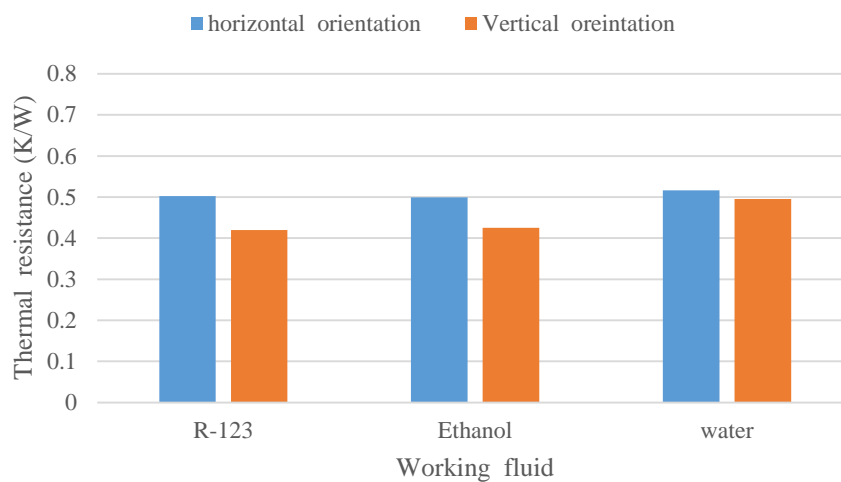
รูปที่ ๗.๘ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



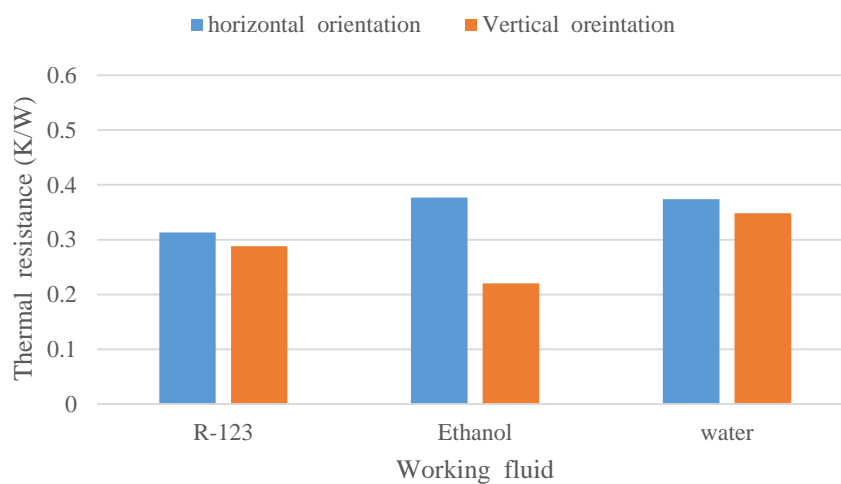
รูปที่ ช.9 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



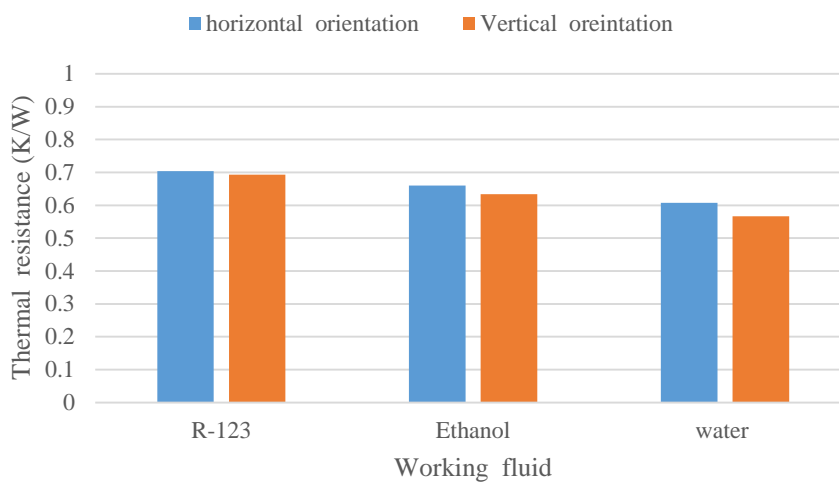
รูปที่ ช.10 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



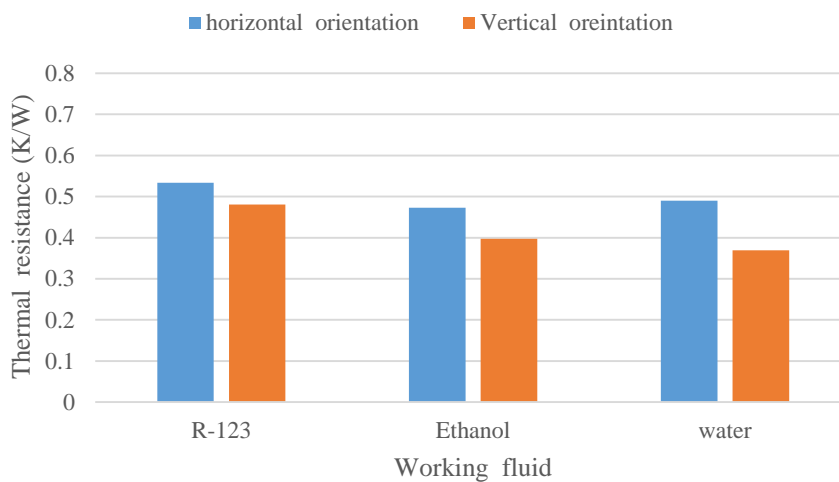
รูปที่ ๑๑.๑๑ แสดงผลของการวางแนวชุดท่อสองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



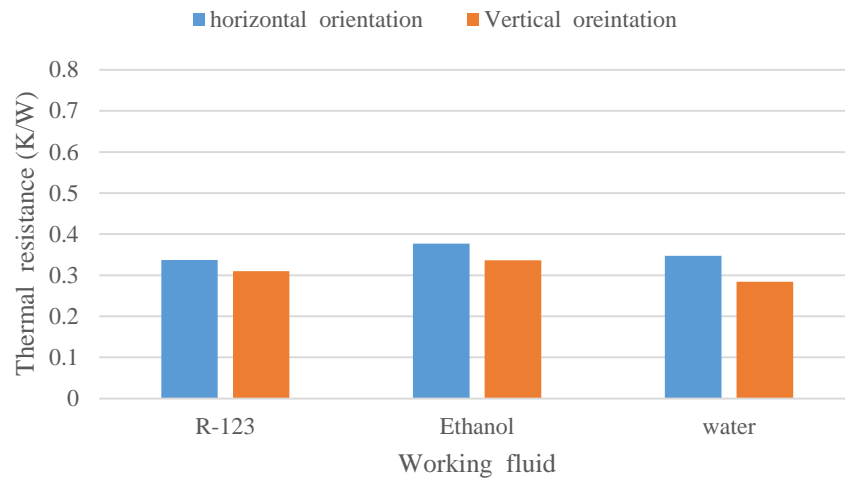
รูปที่ ๑๑.๑๒ แสดงผลของการวางแนวชุดท่อสองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



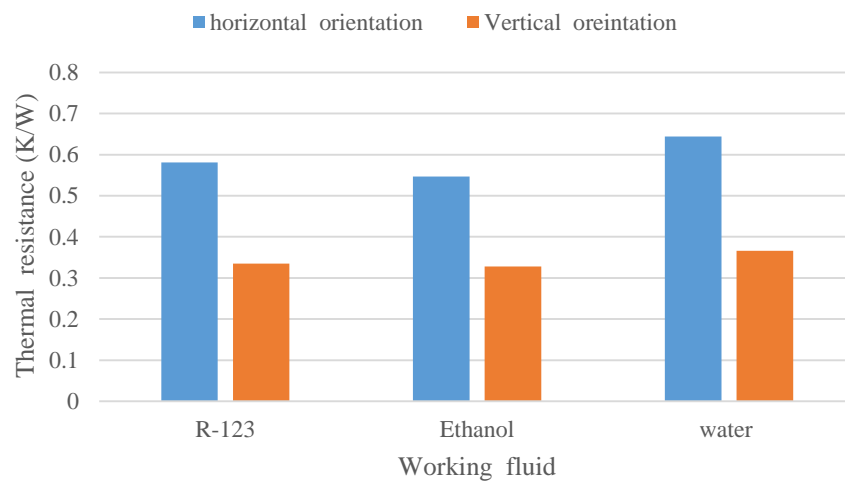
รูปที่ ๑๓.๑๓ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



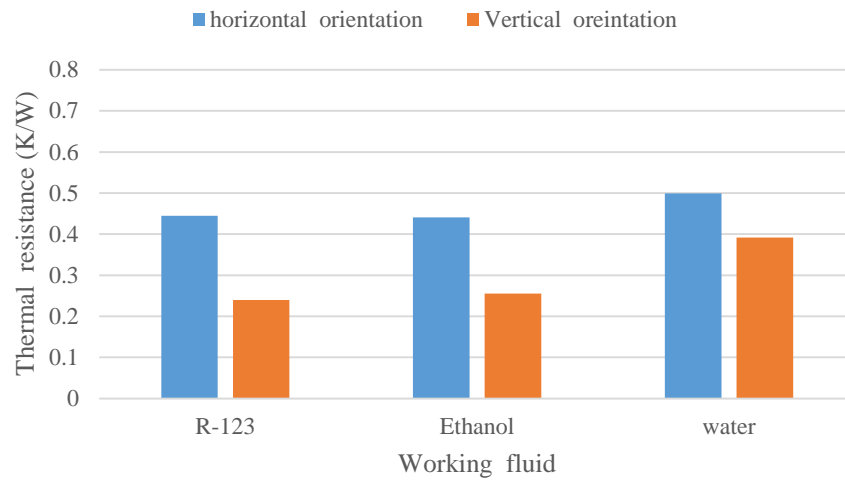
รูปที่ ๑๓.๑๔ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



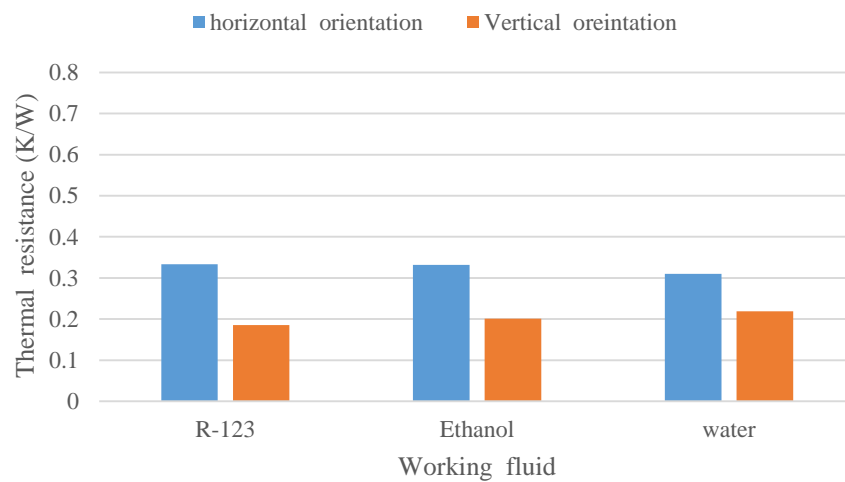
รูปที่ ช.15 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



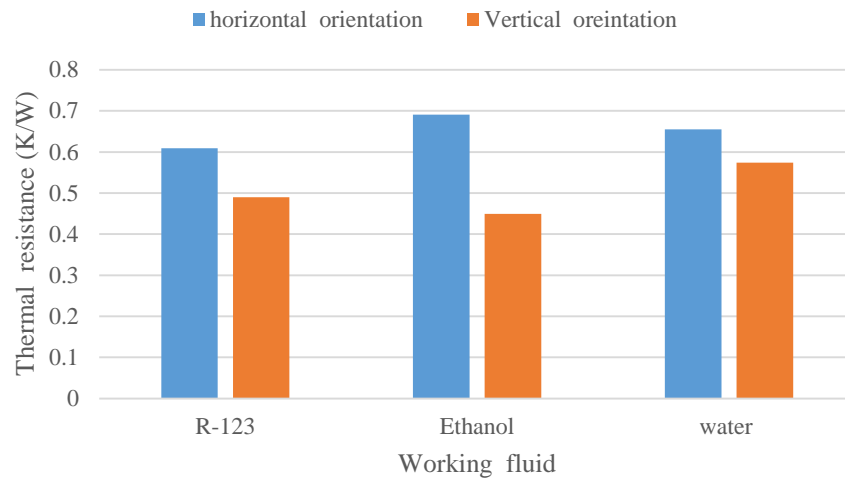
รูปที่ ช.16 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



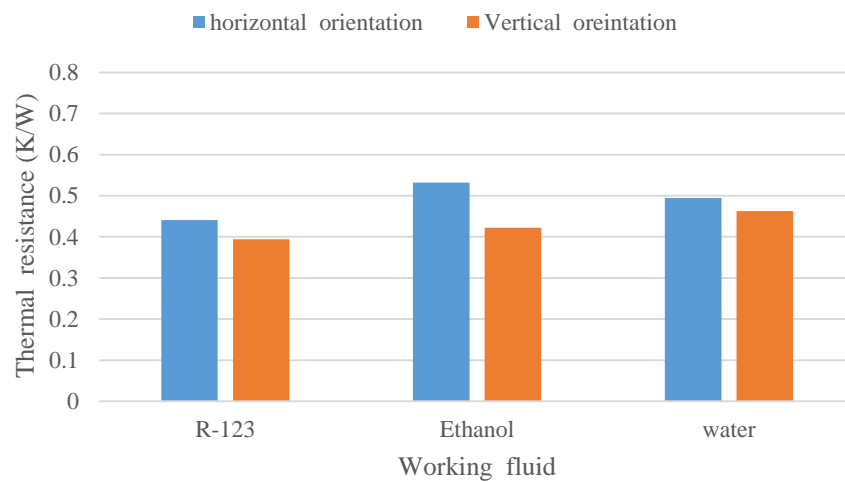
รูปที่ ๑๗.๑๗ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



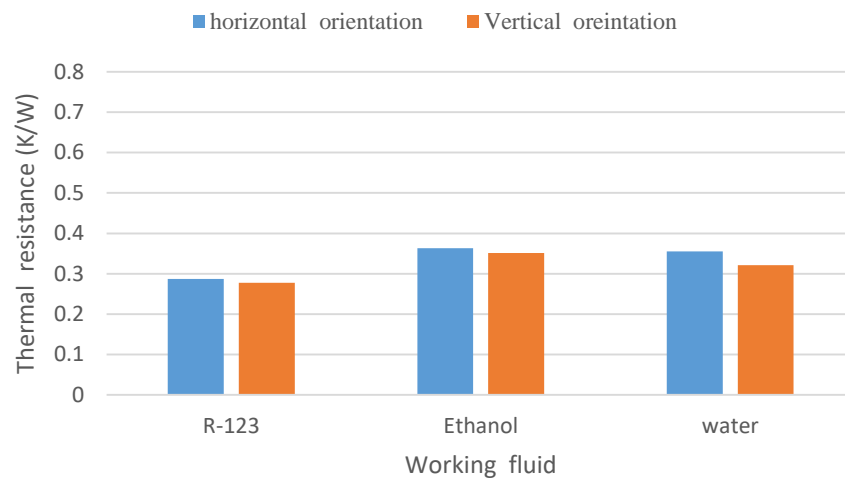
รูปที่ ๑๗.๑๘ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



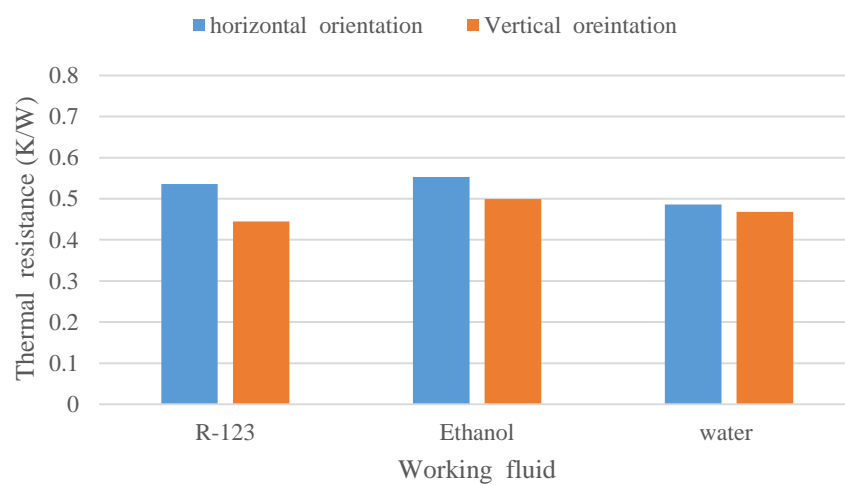
รูปที่ ช.19 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



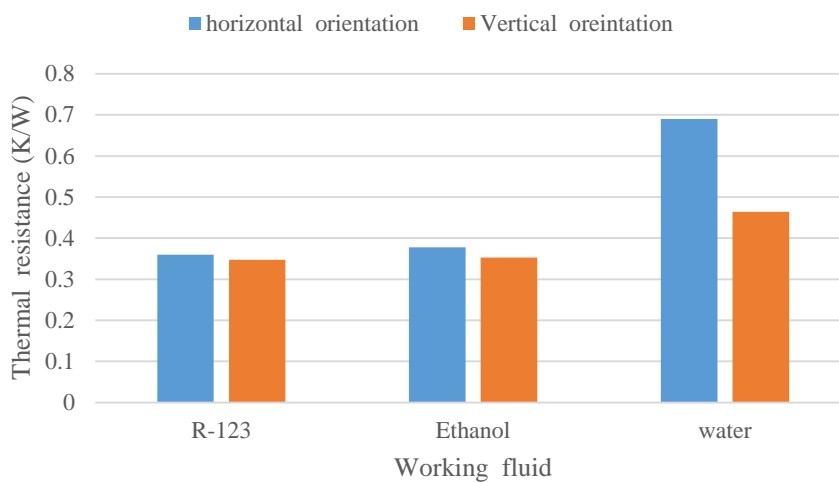
รูปที่ ช.20 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



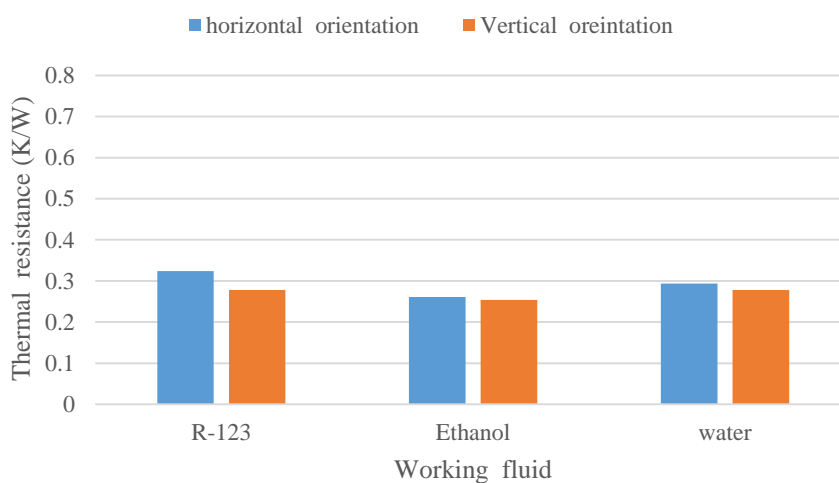
รูปที่ ช.21 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 16 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



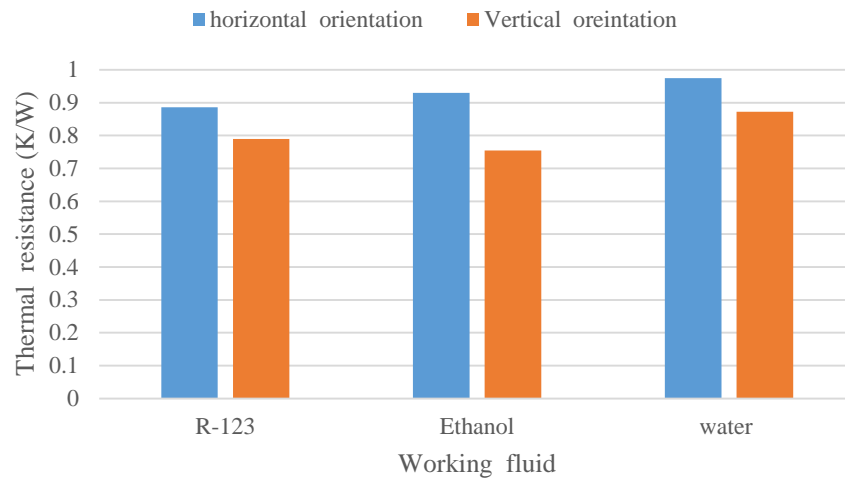
รูปที่ ช.22 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



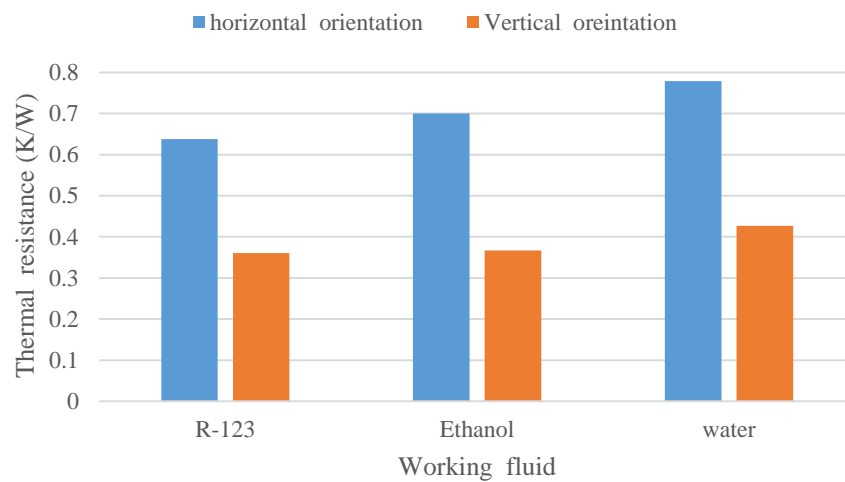
รูปที่ ช.23 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



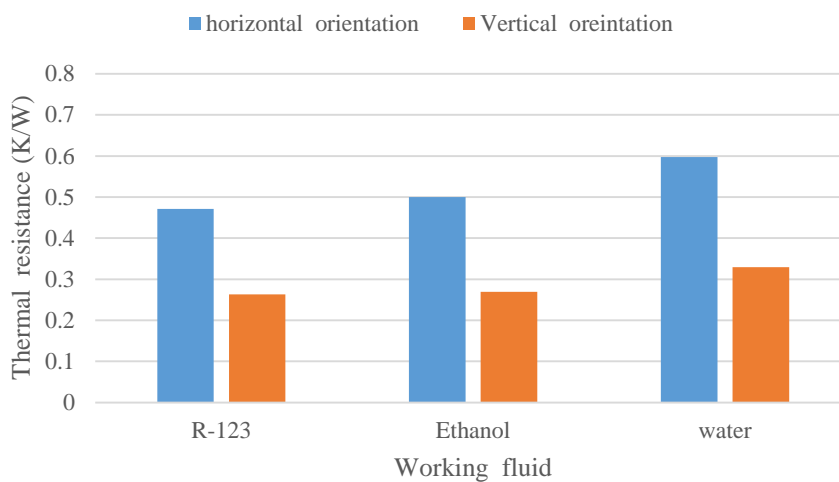
รูปที่ ช.24 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 32 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน



รูปที่ ช.25 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



รูปที่ ช.26 แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm
ทั้ง 3 สารทำงาน



รูปที่ ๒.๒๗ แสดงผลของการวางแนวชุดทดลองระหว่างแนวนอนกับแนวตั้งกับค่าความต้านทานความร้อน ที่ความยาวส่วนทำระเหย 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 40 โค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm ทั้ง 3 สารทำงาน

จากการทดลองทั้งหมดมีจำนวนชุดการทดลอง 27 ชุด ทดลองหาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสัณฐานรอบทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อให้เข้าใจและมองภาพให้เห็นง่ายขึ้นจะแสดงตารางชุดทดลองทั้งหมดและเปรียบเทียบค่าความต้านทานความร้อนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนโดยมีอธิบายตามแต่ละสารทำงาน ดังตาราง ข. ดังนี้



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภูมินทร์ ไกรแสงศรี
วัน เดือน ปี เกิด	10 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลเสนา จ.พระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ที่อยู่ปัจจุบัน	196/176 ม.2 หมู่บ้านนครทองเพชรชิดินทร์ ต.แพรกษาใหม่ อ.เมือง . สมุทรปราการ 10280

