



การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

โดยใช้ของไหลเฟอร์โรภายใต้สนามแม่เหล็ก

ELECTRICAL VEHICLE BATTERY COOLING BY THERMOELECTRIC MODULE
WITH Fe_3O_4 UNDER MAGNETIC FIELD EFFECT

ปณณยวีร์ สุขสุสร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้ของไหลเฟอโรโรกายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ELECTRICAL VEHICLE BATTERY COOLING BY THERMOELECTRIC MODULE
WITH Fe_3O_4 UNDER MAGNETIC FIELD EFFECT



PUNYAWEE SUKSUSRON

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้ของไหลเฟอโรโรกายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก
ของ
ปณณวีร์ สุขสุสร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวិชากรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	 ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์)	(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคดี)
..... ที่ปรึกษาร่วม	 กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามล)	(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

ชื่อเรื่อง	การระบายความร้อนแบบเตอริรยอนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็น เทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ของไหลเฟอร์โรภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก
ผู้วิจัย	บุญยวีร์ สุขสุสร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สงกรานต์ วิริยะศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลเฟอร์โรผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ไหลแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะภายในชุดเครื่องระบายความร้อนที่ติดตั้งในโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตน้ำเย็นสำหรับนำไประบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนให้กับแบบเตอริรยอนต์ไฟฟ้า ในการทดลองจะศึกษาตัวแปรตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ใช้น้ำและของไหลเฟอร์โร (Fe_3O_4) เป็นของไหลหล่อเย็น อัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น การไหลแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ความเข้มข้นของอนุภาคของของไหลเฟอร์โร (Fe_3O_4) ต่อน้ำที่อัตราส่วน 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตร และระยะระหว่างเส้นแรงสนามแม่เหล็กกับชุดเครื่องระบายความร้อนที่ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ของไหลเฟอร์โรมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ โดยของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.015 % มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.005 % และ น้ำประมาณ 20 % และ 30 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้แรงดันตกคร่อมสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาการไหลแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะพบว่าการไหลแบบเป็นจังหวะสามารถเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรที่ 8 % นอกจากนี้ระยะระหว่างเส้นแรงสนามแม่เหล็กกับชุดเครื่องระบายความร้อนมีผลต่อคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โร โดยที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริก, ของไหลเฟอร์โร, เส้นแรงสนามแม่เหล็ก, การไหลแบบเป็นจังหวะ

Title	ELECTRICAL VEHICLE BATTERY COOLING BY THERMOELECTRIC MODULE WITH Fe_3O_4 UNDER MAGNETIC FIELD EFFECT
Author	PUNYAWEE SUKSUSRON
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Songkran Wiriyasart
Co Advisor	Professor Dr. Paisarn Naphon

This research aims to study heat transfer and the flow characteristics of ferrofluid flow through magnetic fields based on continuous flow and pulsating flow in the heat sink of the thermoelectric cooling module for the EV battery pack cooling system. In an experiment, thermoelectric cooling module in which water and ferrofluid (Fe_3O_4) were used as coolants, mass flow rate, continuous flow, and pulsating flow, the concentration ratio of 0.005% and 0.015% by volume and distance between a heat sink and a magnetic field of 1, 1.5, 2, 2.5, and 3 cm are investigated. The results showed that using ferrofluids as a coolant is better than that of water in a thermal performance and a Ferrofluid with a concentration of 0.015% has a higher thermal performance than that of 0.005% and water of 20% and 30% were obtained. However, the pressure difference will also be increased accordingly. In terms of continuous and pulsating flow it was confirmed that the pulsating flow has a higher heat transfer than that continuous flow by approximately 8% in comparison. Moreover, it was observed that the distance between a heat sink and magnetic field has a significant impact on heat transfer and flow behavior of thermoelectric cooling modules and using ferrofluid as a coolant. The 2 cm distance has a higher thermal performance when compared with other values. The increasing mass flow rate at a hot side and a cold side has decreased thermal resistance that can enhance the cooling capacity of the thermoelectric cooling system.

Keyword : Thermoelectric module, Ferrofluids, Magnetic field, Pulsating flow

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และผู้วิจัยต้องขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ได้แก่ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และยังเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการเทอร์โม ของไหล และการถ่ายเทความร้อน (TFHT) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป

บุญยวีร์ สุขสุสร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	3
ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	12
หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)	12
การนำความร้อน	12
การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)	13
การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer).....	14
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)	16
ประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	16
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	19
ครีบริบายความร้อน (Fin)	21

ประสิทธิภาพของครีป	26
ตัวเลขบีโ (Biot number, Bi)	28
เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric)	28
ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์	30
การทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์	30
เทอร์โมอิเล็กทริกส์เจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator)	31
เทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler)	31
โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์	31
การทำความเย็นและการผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์	32
ของไหลนาโน (Nanofluids)	33
การเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลนาโน (Nanofluids)	34
การผลิตของไหลนาโน (Nanofluids)	35
การประยุกต์ใช้ของไหลนาโน (Nanofluids)	35
ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluids)	36
ความหนาแน่นของของไหลนาโน	38
ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	38
ค่าความหนืดสัมบูรณ์	39
ค่าการนำความร้อน	39
อัตราการถ่ายเทความร้อน	39
การไหลเป็นจังหวะ (Pulsating Flow)	40
ปั๊มรีดท่อ (peristaltic pump)	40
แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	42
แม่เหล็ก	42

สนามแม่เหล็ก.....	42
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange battery)	43
ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange batter).....	43
วัสดุสำหรับทำขั้วแคโทด	44
วัสดุสำหรับทำขั้วแอโนด	45
วัสดุสำหรับทำอิเล็กโทรไลต์	46
วัสดุสำหรับทำแผ่นกั้นในแบตเตอรี่	47
วัสดุสำหรับทำตัวรับกระแส	47
หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	48
แนวโน้มการพัฒนาและวิจัยลิเทียมไอออนแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	49
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	50
อุปกรณ์ทดลอง.....	50
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
วิธีการทดลอง	56
ตัวแปรที่ได้จากการทดลอง	57
การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนในชุดเครื่องระบายความร้อน	57
อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$).....	57
อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q_{total}).....	57
เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)	58
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h).....	58
นัสเซลต์นัมเบอร์ (Nu)	58
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	59
ความต้านทานความร้อน (R_t).....	59

บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์.....	60
4.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีชนิดของของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนแตกต่างกัน	61
4.1.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ กรณีความเข้มข้นของของไหลนาโนแตกต่างกัน.....	61
4.1.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	62
4.1.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	63
4.1.4 ตัวเลขนัสเซล (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	64
4.1.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	65
4.2 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอโรฟลูอิดที่มีและไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก โดยของไหลเฟอโรฟลูอิดที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กและโมดูลทำความเย็นที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร	67
4.2.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	67
4.2.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	68
4.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	69
4.2.4 นัสเซลนัมเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	71
4.2.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	72
4.2.6 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	73
4.3 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอโรฟลูอิดที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร.....	76
4.3.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	76
4.3.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	77
4.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	78

4.3.4	นัสเซลน์มเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	79
4.3.5	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	80
4.3.6	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	81
4.4	คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของ ไหลเฟอโรโรที่การไหลแบบราบเรียบและไหลแบบเป็นจังหวะภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร.....	83
4.4.1	ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	83
4.4.2	การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	84
4.4.3	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	85
4.4.4	นัสเซลน์มเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	86
4.4.5	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์.....	87
4.4.6	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	88
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
	สรุปผลการวิจัย.....	90
	ข้อเสนอแนะ	91
	บรรณานุกรม	92
	ภาคผนวก.....	95
	ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติของผงอนุภาคเฟอร์ไรต์ Fe_3O_4	38
ตาราง 2 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ	56



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ	12
ภาพประกอบ 2 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งตามลักษณะการไหล	18
ภาพประกอบ 3 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งตามลักษณะการไหล	18
ภาพประกอบ 4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube.....	19
ภาพประกอบ 5 ครีบน้ำร้อนที่มีหน้าตัดคงที่	21
ภาพประกอบ 6 ประสิทธิภาพของครีบน้ำร้อนโดยระยะความหนาของครีบน้ำเปลี่ยนแปลงกับระยะ x	27
ภาพประกอบ 7 ประสิทธิภาพภาพของครีบน้ำร้อนแผ่นวงกลมที่มีความหนาคงที่	28
ภาพประกอบ 8 ปรากฏการณ์ซีแบค	29
ภาพประกอบ 9 ปรากฏการณ์เพลเทียร์.....	29
ภาพประกอบ 10 โมดูลไฟฟ้าพลังความร้อน.....	32
ภาพประกอบ 11 โครงสร้างบริเวณรอยต่อที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น	32
ภาพประกอบ 12 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ การทำความเย็นด้วยแผ่น TEC	33
ภาพประกอบ 13 อนุภาคของของไหลเฟอร์โร Fe_3O_4 ขนาด 20 – 30 นาโนเมตร	37
ภาพประกอบ 14 แสดงองค์ประกอบต่างๆของปั๊มรีดสายยาง	41
ภาพประกอบ 15 รูปแสดงเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้ว N เข้าหาขั้ว S	42
ภาพประกอบ 16 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (ก) cylindrical (ข) pouch และ (ค) prismatic	43
ภาพประกอบ 17 ภาพแสดงส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange battery)	44
ภาพประกอบ 18 ภาพแสดงหลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	49
ภาพประกอบ 19 ภาพแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	49
ภาพประกอบ 20 ไดอะแกรมและอุปกรณ์การทดลองโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์	51

ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งบนแม่เหล็ก.....	52
ภาพประกอบ 22 เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric)	52
ภาพประกอบ 23 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat sink).....	53
ภาพประกอบ 24 แหล่งจ่ายไฟ (Power supply).....	53
ภาพประกอบ 25 ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump)	53
ภาพประกอบ 26 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)	54
ภาพประกอบ 27 ชิลเลอร์ทำความเย็น (Chiller)	54
ภาพประกอบ 28 หม้อน้ำ (Radiator)	54
ภาพประกอบ 29 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger)	55
ภาพประกอบ 30 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	55
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้ากับทางออก ($T_c - T_s$) กับเวลาโดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน	61
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน	62
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน.....	63
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์ กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์.....	64
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นด้านร้อนต่างกัน	65
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ ของไหลเฟอริไร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน.....	68
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน	69
ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	70
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของ ไหลเฟอริไร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน.....	72

ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอริโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน	73
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวม	74
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	77
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน	78
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	79
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	80
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	81
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวม	82
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	83
ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	84
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	85
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	86
ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	87
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวม	88

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รถยนต์ไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ที่กำลังคืบคลานเข้ามาเพื่อทดแทนรถยนต์สันดาปเพื่อใช้ในอนาคต ปัจจุบันนักวิจัยหลายคนได้ทำการพัฒนาระบบต่างๆของรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่สำคัญที่สุดของรถยนต์ไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ ซึ่งเปรียบเสมือนเหมือนแหล่งพลังงานหลักของรถยนต์ไฟฟ้า และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้านั้นขึ้นก็ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ หากประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ต่ำ สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าก็จะต่ำไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นการชาร์จหรือคายประจุของแบตเตอรี่ หรืออาจกล่าวได้ว่าอายุการใช้งานของรถยนต์ไฟฟ้านั้นล้วนขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ปัจจัยหลัก ในการบำรุงรักษาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่นั้นคือการรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เรียกได้ว่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ถ้าอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงจะทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลงรวมถึงอายุการใช้งานก็ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงระบบระบายความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

เทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่นักวิจัยหลายคนได้นำมาใช้ในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็ก กระทัดรัด น้ำหนักเบา มีความน่าเชื่อถือสูง และสามารถทำความร้อนหรือเย็นได้ง่ายเพียงแค่จ่ายแรงดันไฟฟ้า และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์จะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นบนหน้าสัมผัสทั้งสองด้าน เรียกได้ว่าเทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นคือกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนและความเย็น (Peltier effect) และในทางตรงกันข้ามก็ยังสามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อทั้งสองด้านมีอุณหภูมิแตกต่างกัน (Seebeck effect) จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับข้อดีของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ นักวิจัยหลายคนจึงได้นำด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์มาประยุกต์ใช้กับการระบายความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆ เช่นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น การนำด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ไปใช้ในการระบายความร้อนก็ยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์อีกด้วย โดยปกติแล้วประสิทธิภาพการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์จะขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์จึงต้องทำให้ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์มีการใช้

ของไหลในการถ่ายเทความร้อนมากมายเช่น อากาศ น้ำ รวมไปถึงของไหลนาโน โดยของไหลนาโนเป็นนวัตกรรมใหม่ของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน โดยของไหลนาโนนั้นจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นโลหะหรือไม่ใช่โลหะ มีขนาดน้อยกว่า 100 nm นำไปผสมกับของเหลวเพื่อให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของเหลวนั้น เช่น อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำ อนุภาคนาโนของอลูมิเนียมผสมกับเอทิลีน ซึ่งเมื่อใส่อนุภาคนาโนเข้าไปผสมกับของเหลวแล้วจะได้ของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอย ที่เรียกกันว่า ของไหลนาโน

ในการถ่ายเทความร้อนทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ อาจไม่ได้มีเพียงแค่การใช้ของไหลต่างๆเข้าไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว ยังมีการใช้สแนมแม่เหล็กร่วมกับของไหลนาโนที่มีอนุภาคแม่เหล็กเข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ยังไม่ค่อยมีนักวิจัยทำการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นถึงประสิทธิภาพการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้ของไหลนาโนโดยผสมอนุภาคแมกนีไทต์ Fe_3O_4 หรือที่เรียกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสแนมแม่เหล็ก สำหรับนำไปใช้ระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า จะศึกษาโดยการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และทำการศึกษากันถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่จะส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ต่อชุดครีระบายความร้อน เช่น การใช้ของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านสแนมแม่เหล็ก และระยะห่างของสแนมแม่เหล็กกับชุดครีระบายความร้อน ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า รวมไปถึงการระบายความร้อนของอุปกรณ์อื่นๆได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบชุดครีระบายความร้อนและสร้างชุดทดสอบการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้วยของไหลเฟอร์โรสำหรับระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่จะส่งผลถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของชุดครีระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เช่น การใช้ของไหลเฟอร์โรที่มีและไม่มีเส้นแรงสแนมแม่เหล็ก อัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น ระยะห่างของสแนมแม่เหล็กกับชุดครีระบายความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ และการไหลแบบต่อเนื่องและการไหลเป็นจังหวะ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโดยการทดลอง
2. ศึกษาการถ่ายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้น้ำและของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น
3. ใช้อุณหภูมิแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ที่อัตราส่วนของอนุภาคต่อน้ำเท่ากับ 0.005 - 0.015 โดยปริมาตร
4. ศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ 8 - 12 โวลต์
5. ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และปริมาณกระแส 10 แอมแปร์
6. ศึกษาอัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น 30-50 ลิตร/ชั่วโมง
7. ศึกษาระยะห่างของสนามแม่เหล็กกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น ที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, 3 เซนติเมตร
8. ศึกษาการไหลแบบต่อเนื่องและการไหลเป็นจังหวะ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของชุดรีบายความร้อนโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้น้ำและของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น สำหรับระบายความร้อนให้แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
2. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้ของไหลเฟอร์โรร่วมกับสนามแม่เหล็ก สำหรับระบายความร้อนให้แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
3. ทราบถึงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จะส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เช่น การใช้น้ำและของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น อัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ การใช้ของไหลเฟอร์โรร่วมกับสนามแม่เหล็ก และระยะห่างของสนามแม่เหล็กกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ราว หวัง และคณะ (Rao และ Wang, 2011) ทบทวนบทความเกี่ยวกับการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้า (EV) รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV) รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (FCEVs) แบตเตอรี่พลังงานสูง เช่น นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH), ลิเทียมไอออน (Li-ion) และเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFCs) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพฤติกรรมทางความร้อนของแบตเตอรี่ รายละเอียดเทคนิคการจัดการระบายความร้อนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการ

จัดการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ P เซนติเมตร และการนำความร้อนของวัสดุ สรุปได้ว่า EVs, HEVs และ FCEVs มีประสิทธิภาพในการลด GHG การปล่อยมลพิษและประหยัดพลังงานในสถานะที่การทำงานที่ไม่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการคายประจุสูงและมีอุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิแวดล้อมสูง ระบบการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่แบบดั้งเดิม เช่น อากาศและของเหลวอาจไม่เพียงพอ ซึ่งท่ความร้อนแบบพัลส์ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนมากกว่าแต่ต้องได้รับการออกแบบมาอย่างดี การจัดการระบายความร้อนของแบตเตอรี่แบบ P เซนติเมตร คือ ตัวเลือกที่ดีกว่าอย่างอื่น

ซู เทน และคณะ (Zhu, Tan, และ Yu, 2013) ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกส์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาส่วนใหญ่เน้นเรื่องรูปทรงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พื้นที่ถ่ายเทความร้อนรวม การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ทั้งด้านร้อนและด้านเย็นและคุณสมบัติของวัสดุจะถูกจำลองด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุด (COP) รวมไปถึงฟลักซ์ความร้อนสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกส์และอุณหภูมิต่ำสุดด้านเย็นสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนอย่างเหมาะสม รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม

อซิเซียน และคณะ (Azizian et al. 2014) ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการไหลเวียนของความดันตกคร่อมของของไหลนาโนแมกไนต์ ภายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบ ($Re < 830$) โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความแรงของสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นมีความค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขของเรย์โนลด์ (Re) ที่สูงขึ้น 4 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ที่เรย์โนลด์เท่ากับ 745 และความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กต่อระยะเท่ากับ 32.5 mT/mm โดยที่มีของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันตกคร่อมมีค่าเพียงเล็กน้อยเนื่องจากแรงดันตกเพิ่มขึ้นเพียง 7.5 % ที่ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 430 mT และความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กต่อระยะระหว่าง 8.6 และ 32.5 mT/mm จากผลที่ได้จากการจำลองอิทธิพลของสนามแม่เหล็กและการกระจายแรงแม่เหล็ก จึงสามารถสรุปได้ว่ากลไกการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นการสะสมของอนุภาคที่อยู่ใกล้กับแม่เหล็กซึ่งนำไปสู่การนำความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการก่อดวของมวลรวมกันซึ่งทำหน้าที่เพิ่มโมเมนตัมและการถ่ายโอนพลังงานในการไหล

ชาว แทน และคณะ (Zhao และ Tan, 2014) ทำการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานกรณีใช้วัสดุของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง การใช้งานระบบระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อดีเหนือกว่าอุปกรณ์ระบายความร้อนทั่วไปเนื่องจากมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา มีความน่าเชื่อถือสูง ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เชิงกล ไม่มีของเหลวทำงานถูกขับเคลื่อนโดยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ สามารถทำความเย็นและความร้อนได้ง่าย เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ในการศึกษาครั้งนี้ที่จะกล่าวถึงการพัฒนาของการระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกและการพัฒนาวัสดุสำหรับทำเทอร์โมอิเล็กทริก เทคนิคการสร้างแบบจำลองจะอธิบายเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กเมนต์และการสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก (TEC) รวมถึงแบบจำลองสมดุลพลังงานแบบง่ายแบบ 1 มิติ และ 3 มิติ ผลที่ได้จากการศึกษาคือสามารถประยุกต์การใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกการทำทำความเย็นภายในบ้าน, การทำความเย็นของอิเล็กทรอนิกส์, การใช้งานทางวิทยาศาสตร์และการควบคุมอุณหภูมิรถยนต์

ฮู กี และคณะ (Hu, Ge, Dai, และ Wang, 2015) ทำการศึกษาโดยนำโมดูลการระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกสองชั้นตอน (TEM) มาใช้ใน IEF เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและแม่นยำ การทดลองอุปกรณ์ระบายความร้อนต้นแบบเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ชุดทดลองต้นแบบที่แตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ HP + baffle, AL + baffle และ HP + fin ได้รับการพัฒนาเพื่อให้ได้การออกแบบที่ดีที่สุด การกระจายอุณหภูมิบนแผ่นทำความเย็น, COP, และอุณหภูมิอากาศที่ลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นอุณหภูมินิยมที่มีท่อความร้อนซึ่งใช้เป็นแผ่นทำความเย็นทำให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ นอกจากนี้ครีระบายความร้อนชนิดครีที่มีแผ่นกันสามารถกระจายความร้อนด้านร้อนของ TEM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่อุณหภูมิของฟินของ HP + baffle อยู่ที่ 10°C และ COP เท่ากับ 2.0 ภายใต้สภาพการทำงานทั่วไป

แทน เดมิเรล และคณะ (Tan และ Demirel, 2015) ทำการศึกษาเกี่ยวกับทำความเย็นสามระบบเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและประสิทธิภาพของ CPU และเมนบอร์ด ลักษณะอุณหภูมิและประสิทธิภาพของ CPU ได้รับการทดสอบด้วยชุดระบายความร้อน, ระบบน้ำหล่อเย็น, และเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก จากผลการศึกษาพบว่าระบบระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่ดีกว่าอีกสองระบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของ CPU มีค่าสูงเมื่อระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน

อฮัมเมต และคณะ (Ahammed, Asirvatham, และ Wongwises, 2016) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ของไหลนาโนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ชุดเครื่องระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กแบบหลายช่อง ในการศึกษาจะใช้ของไหลนาโนบิสมีเทลลูไรด์มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 67 องศาเซลเซียส เพื่อพาความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 20 วัตต์ถึง 400 วัตต์ ของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ศึกษาที่มีความเข้มข้น 0.1% และ 0.2% โดยปริมาตร ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) เพิ่มขึ้น 40% รวมไปถึงความแตกต่างของอุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริกระหว่างด้านร้อนและเย็นลดลง 9.15% เมื่อใช้ของไหลนาโนความเข้มข้น 0.2% โดยปริมาตร จึงสรุปได้ว่าของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 0.2% เรย์โนลด์สเบอร์ 1,000 และกำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ทำให้นั้สเซลนัมเบอร์นั้นเพิ่มขึ้น 23.92% และยังพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบระบายความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปริมาตรของไหลนาโนเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ให้นาโนอิเล็กโทรไลต์เป็นสารหล่อเย็นที่มีแนวโน้มที่ดีสำหรับการใช้งานในการทำความเย็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอส เอส ไดซาจิ และคณะ (Sadighi Dizaji, Jafarmadar, Khalilarya, Moosavi, 2016) ศึกษาการระบายความร้อนด้วยการไหลของอากาศผ่านระบบ TEC โดยใช้ น้ำและอากาศเป็นของไหลหล่อเย็นสำหรับการระบายความร้อนทางเลือก อุณหภูมิด้านร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกถูกปรับโดยอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ต่ำและไม่ใช้พัดลมระบายอากาศ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาพบว่าด้านความเย็นของระบบทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อนให้กับอากาศได้ดีเมื่อด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกระบายความร้อนด้วยน้ำ

ไค หลุย และคณะ (Cai, Liu, Zhao, และ Tang, 2016) ทำการศึกษาวิจัยสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกและขนาดของชุดเครื่องระบายความร้อนภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การศึกษาจะวิเคราะห์ระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 ชุด ภายใต้สภาวะอุณหภูมิของชิปอิเล็กทรอนิกส์คงที่และให้การทำความเย็นระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกคงที่ โดยศึกษาสมรรถนะของเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีฮีตซิงค์และไม่มีฮีตซิงค์ระบายความร้อนที่ด้านร้อนเพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิของชิปต่ำสุดและสูงสุดและความสามารถในการทำความเย็นภายใต้สภาวะที่กำหนด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกส์และฮีตซิงค์ระบายความร้อนมีความสำคัญต่อการระบายความร้อนภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) และความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเล็กน้อยภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด อาจกล่าวได้ว่าระบบ TEC ที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อควบคุมพารามิเตอร์การทำงานไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง

ฮู กิ และคณะ (Hu, Ge, Dai, และ Wang, 2016) ทำการศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกส์ร่วมกับน้ำสำหรับหน่วยประมวลผลกลางหรือที่เรียกว่า ซีพียู (CPU) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ 2 ตัวสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกส์และเปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อป้องกันการควบแน่นที่จะเกิดขึ้นกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และช่วยให้ประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยการควบคุมอุณหภูมิ 2 ตัวจะถูกตรวจสอบภายใต้การใช้งานและอุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้แก่ ในการทดลองจะศึกษาถึงความเร็วของอากาศและอัตราการไหลของน้ำภายในชุดครีระบายความร้อนภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบไดนามิกของการทำความเย็นทั้ง 3 วิธี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของ CPU (Tcpu) สำหรับ SC ต่ำกว่า OC เมื่อ Tcpu ต่ำกว่าอุณหภูมิที่คาดการณ์ไว้ อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลของน้ำจะอยู่ที่ $0.8 \text{ m}^{\text{s}^{-1}}$ และ $0.042 \text{ kg}^{\text{s}^{-1}}$ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดของ Tcpu ต่ำกว่า 1.5°C ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

เชอเรฟ และคณะ (Cherief และคนอื่น ๆ, 2017) ศึกษาการประยุกต์ใช้ของไหลเฟอโรโรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การพาความร้อน และการลดลงของแรงดันในระบบดังกล่าวมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และการออกแบบช่องการไหล ซึ่งต้องมีการออกแบบมาเป็นอย่างดี ตัวแปรที่สำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการระบายความร้อนด้วยได้แก่ เรย์โนลด์สเบอร์ (Re) โดยพบว่าในช่วง $100 < \text{Re} < 2500$ เป็นช่วงที่เหมาะสม ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ความยาวของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก อัตราการไหลเชิงมวล และความเข้มข้นของอนุภาค การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ของไหลเฟอโรโรในระบบความร้อนนั้นดีที่สุดเมื่อจำนวนเรย์โนลด์สต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าพฤติกรรมความร้อน – ไฮดรอลิกที่สูงที่สุดนั้นเมื่อของไหลเฟอโรโรมีตัวด้วยสนามแม่เหล็กซึ่งตั้งฉากกับทิศทางความร้อนและแหล่งกำเนิดแม่เหล็กตั้งและตั้งอยู่ในบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนและการไหลแบบเต็มขั้น (Fully develop) ของการไหลของของไหล

แกว หวัง และคณะ (Gao, Lv, Wang, และ Yan, 2017) ทำการศึกษาวิจัยการเพิ่มความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์แบบสองชั้นโดยกระแสสัญญาณแบบพัลส์ เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมอิเล็กทริกส์แบบชั้นเดียวแล้ว เทอร์โมอิเล็กทริกส์แบบสองชั้นนั้นสามารถทำให้อุณหภูมิลดลงได้ดีกว่า เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกส์ทำงานภายใต้สภาวะคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกส์แบบสองชั้นตอนจะให้อุณหภูมิในด้านเย็นที่ต่ำกว่าและระยะเวลาในการทำ ความเย็นที่ยาวนานกว่าเทอร์โมอิเล็กทริกส์แบบชั้นตอนเดียว อุณหภูมิเย็นต่ำสุดสามารถปรับปรุงได้ดีขึ้นโดยการจับคู่ระหว่างช่วงความสูงของสัญญาณพัลส์และช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์บนด้านเย็น, ช่วงความสูงของสัญญาณพัลส์และช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์บนด้านร้อน ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อาจมีประโยชน์สำหรับการออกแบบและการระบายความร้อนแบบทราเนียนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

เอ็ม จีแกค และ เอฟ ซาฮิน (Gökçek และ Şahin, 2017) ทำการศึกษาระบบระบายความร้อนของตู้เย็นที่ประกอบด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์สองโมดูลร่วมกับฮีทซิงค์ที่มีช่องการไหลขนาดเล็กที่ด้านร้อนและเย็น การทดลองได้ทำการทดลองโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันและอัตราการไหลที่แตกต่างกันของน้ำที่ใช้ระบายความร้อนในช่องการไหลขนาดเล็ก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในของตู้เย็นนั้นมีอุณหภูมิประมาณ 2 องศาเซลเซียส สำหรับอัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที ขณะที่อุณหภูมิภายในของตู้เย็น -0.1 องศาเซลเซียส สำหรับอัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 2 ชั่วโมง ค่า COP ของตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นอยู่ที่ 0.23 ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ขณะที่ค่าของ COP อยู่ที่ 0.19 ที่อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที ใน 25 นาที เมื่อกล่าวถึงแรงดันไฟฟ้าของระบบ 8 โวลต์ ค่า COP ของตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกส์จะอยู่ที่ประมาณ 0.41 เมื่อระยะเวลา 25 นาที สำหรับอัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ผลการวิจัยสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของฮีทซิงค์ช่องการไหลขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ดีพอ ๆ กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเหลวอื่น ๆ ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

เอ็ก ชัน และคณะ (Sun, Zhang, และ Liao, 2017) ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการสะสมความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ร่วมกับท่อความร้อนแบบแรงโน้มถ่วง ความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่ขนาดเล็กนั้นมีความสำคัญและยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการนำอุปกรณ์เหล่านี้เข้ามาใช้ในการทำงานที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากการพัฒนาซอฟต์แวร์และเทคโนโลยีด้านการสื่อสาร ดังนั้นการจัดการความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ไม่เกิด

ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไป ในการควบคุมการสะสมความร้อนภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการนำเสนอบรรบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก (TEC) พร้อมกับท่อความร้อนที่มีแรงโน้มถ่วงช่วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนตามสมการอนุรักษ์พลังงานได้รับการพัฒนาเพื่อวิเคราะห์ระบบเพื่อออกแบบระบบต้นแบบที่มีความเหมาะสม จากนั้นจึงสร้างและทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพ การทดสอบจะจำลองสภาพแวดล้อมแบบต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น 64.8% และการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 39.3% สำหรับเงื่อนไขที่คล้ายกันเมื่อระบบที่นำเสนอถูกนำมาเปรียบเทียบกับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกส์พร้อมกับฮีทซิงค์ระบายความร้อนด้วยอากาศ

หวัง ยู และคณะ (Wang, Shi, และ Liu, 2017) ทำการศึกษาโดยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของตู้เย็นที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้เงื่อนไขของการระบายความร้อนที่ด้านร้อน ความจุ และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำความเย็นให้สูงสุด นอกจากนี้ยังได้จัดตั้งแพลตฟอร์มการทดลองสำหรับระบบระบายความร้อนขนาดเล็กแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการต่อเข้ากับท่อความร้อนและการออกแบบท่อสเปย์เลอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อน ในการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็น ท่อระบายอากาศด้านข้างและสเปย์เลอร์เย็น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกควบคู่กับท่อความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการใช้พารามิเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น อัตราการระบายอากาศของด้านเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเมื่อมีการระบายความร้อนที่ด้านร้อนเพิ่มขึ้น การประยุกต์ใช้ท่อสเปย์เลอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นเป็นอย่างมีนัยสำคัญ

ลยู และคณะ (Lyu และคนอื่น ๆ, 2019) ทำการศึกษาเชิงทดลองระบบการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ระบบการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นเป็นการผสมผสานระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริก, การระบายความร้อนด้วยอากาศ และการระบายความร้อนด้วยของเหลว ของไหลหล่อเย็นเหลวมีการสัมผัสโดยตรงทางอ้อมกับแบตเตอรี่และทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่ในระหว่างการใช้งาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการทำความเย็นที่มีแนวโน้มที่ดีพร้อมกับการกระจายพลังงานในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ การทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวของแบตเตอรี่ลดลงประมาณมา 43 องศา

เซลล์ 55 องศาเซลเซียส เป็น 12 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการทำความเย็นที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

เมลเมอร์ และคณะ (Malmir-Cheginini และ Amanifard, 2019) ทำการศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์และไฮโดรเทอร์มัลของของไหลนาโนที่ไหลแบบแบบราบเรียบซึ่งกระทำโดยสนามแม่เหล็กแบบไม่ต่อเนื่องในหลอดกึ่งฉนวนแนวนอน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย เรย์โนลด์สเบอร์ (Re), ความเข้มข้นแม่เหล็ก (Mn), ฟลักซ์ความร้อนติดผนัง (q) รวมไปถึงตำแหน่งของขดลวดแม่เหล็ก ถูกตรวจสอบเกี่ยวกับการไหลและความร้อน ลักษณะการถ่ายโอน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบระบายความร้อนกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมกรณีที่มีสนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กประมาณ 3.7 และ 1.8 เท่า ที่ $Re = 500$, $Mn = 5.7 \times 10^3$ ตามลำดับ

วิริยะศาสตร์ และคณะ (S. Wiriysart, Hommalee, Prurapark, Srichat, Naphon, 2019) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับตู้ทำน้ำร้อนน้ำเย็น ในการศึกษาจะออกแบบชุดระบายความร้อนจากนั้นจึงใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหารูปแบบของครีปที่ติดตั้งในชุดครีระบายความร้อนเพื่อให้ได้ความสามารถในการระบายความร้อนสูงสุด ในการทดลองโมดูลทำน้ำร้อนน้ำเย็นจะใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ 3 สามแผ่นและ 5 แผ่นตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการทำความร้อนและการใช้พลังงานของตู้ทำน้ำร้อนน้ำเย็นด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูล (TMS II) เปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนน้ำเย็นร้อนแบบธรรมดาที่มีระบบทำความเย็นแบบปั๊มอัด (CRS) และเครื่องต้นแบบตู้ทำน้ำร้อนพร้อมระบบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (TMS I) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของน้ำเย็นและน้ำร้อนจาก TMS II คือ 8°C , 64°C ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงการใช้อุณหภูมิของตู้ทำน้ำเย็นร้อน การใช้พลังงานของ TMS II ต่ำกว่ารุ่นต้นแบบ (TMS I) 29.31% และอยู่ในระดับเดียวกันกับ CRS ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบตู้ทำน้ำร้อนน้ำเย็นด้วยระบบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์

วิริยะศาสตร์ และคณะ (Songkran Wiriysart, Hommalee, และ Naphon, 2019) ทำการศึกษาโดยการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบสอง CPU ของคอมพิวเตอร์ด้วยโมดูลอากาศเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบไปด้วยภาระการทำงานของ CPU ของคอมพิวเตอร์ ที่มีและไม่มีโมดูลทำอากาศเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก การเปิดและปิดพัดลมระบายความร้อน และขนาดของพัดลมระบายความร้อนที่แตกต่างกัน ในการทดลองจะกำหนดภาระการทำงานของ CPU ของคอมพิวเตอร์ที่ 0–100%

จากการศึกษาพบว่าโมดูลทำอากาศเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส่งผลต่ออากาศที่ไหลเวียนภายในชุดคอมพิวเตอร์และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับ CPU ของคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าภาระการทำงาน ตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของพัดลมระบายความร้อนมีผลอย่างมากต่อการกระจายอากาศเย็นภายในชุดคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานก็เพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อติดตั้งโมดูลอากาศเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

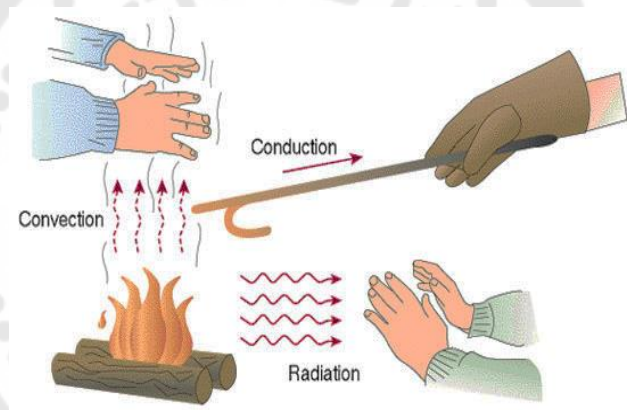
วิริยะศาสตร์ และคณะ (S. Wiryasart, Naphon, และ Hommalee, 2019) ทำการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการทำความเย็นและร้อนของระบบพัดลมไอเย็น โดยที่โมดูลฝั่งด้านเย็นประกอบด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์หกตัว, ตู้น้ำเย็น และตู้น้ำร้อน ในขณะที่โมดูลทางด้านร้อนประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก 3 แผ่น ตู้น้ำร้อนและตู้น้ำเย็น ผลที่ได้จากการศึกษาจะถูกเปรียบเทียบกับระบบพัดลมแบบเดิม (ไม่มีโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก) จากการศึกษพบว่าอุณหภูมิน้ำต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกคือ 12°C และ 70°C ตามลำดับ สำหรับโหมดเปิด - ปิดทุกๆ 5 นาทีอากาศเย็นเฉลี่ยที่ได้จากระบบพัดลมที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกส์ต่ำกว่า 2.0°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอุ่นโดยเฉลี่ยสูงกว่า 2.5°C

บทที่ 2

ทฤษฎี

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

ความร้อน (Heat) คือ พลังงานที่ถ่ายเทระหว่างจุดสองจุดที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลทางความร้อนของจุดสองจุดนั้นและการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คือ การถ่ายเทของพลังงานที่เกิดเนื่องจากความไม่สมดุลทางความร้อนของจุดสองจุด โดยเมื่อความร้อนถ่ายเทจะทำให้จุดที่ได้รับความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น สรุปได้ว่ากลไกการถ่ายเทความร้อนคือ วิธีการที่ความร้อนเกิดการเคลื่อนตำแหน่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมี 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสี



ภาพประกอบ 1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ

ที่มา: Science and Technology

การนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) คือ ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลางเดียวกันหรือเป็นการเคลื่อนที่ทางจลนศาสตร์หรือการสัมผัสกันโดยตรงของโมเลกุล ซึ่งถ่ายเทจากโมเลกุลที่มีพลังงานสูงไปสู่โมเลกุลที่มีพลังงานต่ำ ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น โลหะที่เป็นตัวนำความร้อนได้ดี ได้แก่ ทองแดง เงิน เป็นต้น

หลักในการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย Joseph Fourier นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โดยได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ดังนี้

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) (W / mK)

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน, (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับระยะทาง

เนื่องจากการนำความร้อนนั้นจะมีค่าลดลงตามระยะทาง จึงมีเครื่องหมายเป็นลบ แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เราพิจารณานั้นมีค่าเป็นบวกเสมอ จึงปรากฏเครื่องหมายลบอยู่หน้าสมการข้างต้น

การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อน (Convection) คือ เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุ โดยที่อุณหภูมิและของไหลนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน การพาความร้อนนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนแบบอิสระ (Natural หรือ Free convection)

1. การพาโดยการบังคับ (Forced convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ซึ่งของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็งโดยมีกลไกภายนอกเป็นตัวขับเคลื่อน เช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ

2. การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับผิวของไหล โดยที่ไม่มีกลไกภายนอกใด ๆ มาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล สมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ไว้ดังนี้

$$q = h(T_h - T_c) \quad (2-2)$$

โดยที่ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล มีหน่วยเป็น W

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) , $W / m^2 \cdot K$

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล , m^2

T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อน , K

T_c คือ อุณหภูมิที่เย็น , K

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นแปรตามชนิดของการไหล (ราบเรียบหรือปั่นป่วน) ลักษณะของผิววัตถุที่ไหลผ่าน สมบัติทางกายภาพของของเหลว อุณหภูมิเฉลี่ย การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับหรือแบบอิสระ รวมไปถึงตำแหน่งต่างๆตามผิวของของแข็ง

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสี (Radiation) คือ เป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน (มีหรือไม่มีตัวกลางก็ได้) แต่สำหรับการถ่ายโอนพลังงานความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน สามารถแผ่มาได้เองในรูปของรังสีความร้อน เช่น ดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนมายังโลก หรือพลังงานรังสีความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในความเป็นจริงแล้วการเกิด การแผ่รังสีเกิดการแผ่รังสีอย่างแท้จริงของความร้อนระหว่างวัตถุใด ๆ จะไม่ทำให้อุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มสูงขึ้น เมื่อรังสีนี้ไปตกกระทบวัตถุใด ๆ บางส่วนอาจจะสะท้อนกลับออกมา บางส่วนอาจจะส่งผ่านทะลุไป บางส่วนอาจถูกดูดกลืนไว้ก็ได้ และถ้ารังสีตกกระทบคือ รังสีความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้จะปรากฏเป็นความร้อนภายในวัตถุนั้นด้วยความเร็วแสง การแผ่รังสีความร้อนสามารถผ่านสุญญากาศได้ซึ่งต่างจากการนำความร้อน และการพาความร้อนซึ่งจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนพลังงานการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \sigma AT^4 \quad (2-3)$$

โดยที่ σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ซึ่งมีค่า $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$ ในระบบ SI สมการนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือต่าง ๆ

ในปัจจุบันปัญหาของการแผ่รังสีกำลังมีผู้สนใจมากเป็นพิเศษ เนื่องจากขาดแคลนพลังงาน พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งแผ่จากดวงอาทิตย์มายังโลกเป็นแหล่งพลังงานที่อาจจะนำมาใช้ทดแทนพลังงานที่กำลังใช้อยู่ในปัจจุบันได้

วัตถุที่จะให้ค่าการแผ่รังสีสูงสุดตามสมการ (2-3) เรียกว่า วัตถุอุดมคติ (Ideal Body) หรือวัตถุดำ (Black Body) วัตถุที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุโดยทั่ว ๆ ไปที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะเขียนได้ดังนี้

$$Q = E\sigma AT^4 \quad (2-4)$$

โดยที่ E คือคุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ ซึ่งเรียกว่าค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุดจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

สมการ (2-4) ใช้สำหรับหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุที่มีพื้นที่การที่จะหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิต่างกันนั้นยุ่งยากมาก เราจะพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิวและค่าการแผ่รังสีความร้อนกับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิและวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิเราจะเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิระหว่างวัตถุทั้งสอง ได้เป็น

$$Q_n = E\sigma A(T_h^4 - T_c^4)$$

เราอาจจะเขียนสมการสำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_n &= E\sigma A(T_h^2 + T_c^2)(T_h^2 - T_c^2) \\ Q_n &= E\sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c)A(T_h - T_c) \\ Q_n &= h_r A(T_h - T_c) \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$h_r = E\sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c) \quad (2-6)$$

h_r คือ สัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ยินยอมใช้กันมากในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานสองตัวหรือมากกว่าสองตัวที่มีอุณหภูมิต่างกัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับระดับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและขนาดของโรงจักรไอน้ำ กระบวนการต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรมทางเคมี หรือขนาดความต้องการที่จะทำความร้อนและความเย็น

ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เพราะเป็นเรื่องที่มีความร้อน ความดัน ขนาดและประสิทธิภาพของระบบเข้ามาเกี่ยวข้อง

ประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1. แบ่งตามกระบวนการถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วไปนั้นการถ่ายเทความร้อนยังแยกได้เป็น การสัมผัสโดยตรงกับการสัมผัสโดยอ้อม การสัมผัสโดยตรงนั้นเกิดจากการไหลของของไหลสองชนิดมาผสมกัน เช่น แก๊สและของเหลว ตัวอย่างการถ่ายเทความร้อนแบบการสัมผัสโดยตรงนั้น เช่น หอหล่อเย็น หัวฉีดเครื่องควบแน่นและสเปรย์ชนิดต่างๆ

ในการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยอ้อม จะพบได้ในรังผึ้งรถยนต์ สารทำงานร้อนเย็นจะถูกแยกโดยแผ่นกั้นซึ่งเรียกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบผิวสัมผัส ซึ่งไม่มีการผสมกันระหว่างสารทำงาน

2. แบ่งตามลักษณะความกะทัดรัดของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน

วิธีนี้เป็นการแยกโดยไม่มีอะไรมากมาย แบ่งตามอัตราส่วนพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งตั้งเกณฑ์ในการแบ่งนี้เรียกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด เช่น รังผึ้งรถยนต์ มีความหนาแน่นของพื้นที่เท่ากับ $1100 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบบางเครื่องมีความหนาแน่นของพื้นที่เท่ากับ $6600 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

3. แบ่งตามลักษณะของการออกแบบ

แบ่งได้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Tubular แบบแผ่นและครีป แบบท่อและครีป และแบบ Regenerative

3.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Tubular นั้นเป็นที่ยินยอมอย่างมากและในการผลิตสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบและขนาดได้ตามต้องการ นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อีกด้วย โดยปกติเราเรียกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งประกอบไปด้วยท่อเล็ก ๆ

3.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เป็นการใช้แผ่นบาง ๆ แต่จะไม่สามารถทนต่อความดันสูงๆหรืออุณหภูมิที่ต่างกันมากได้ ฉะนั้นการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนชนิดนี้จึงต้องพิจารณาในเรื่องของอุณหภูมิและความดันด้วยโดยมีค่าความกะทัดรัดอยู่ที่ $120 - 230 \text{ m}^2 / \text{m}^3$

3.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและครีป มีค่าความกะทัดรัดสูงถึง $6,000 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ซึ่งลักษณะการไหลจะมีทั้งการไหลตามขวาง การไหลตัดกัน การไหลขนาน โดยปกติจะใช้ แก๊ส - แก๊ส แต่ต้องใช้ความดันต่ำที่ค่าความดันไม่เกิน 10 atm (1000 kPa) อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 800°C

3.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีป ใช้งานในที่ที่มีความดันสูงหรือใช้ในการไหลที่มีทิศทางเดียว ซึ่งมีสองชนิด ชนิดแรกเป็นท่อกลมตรง และอีกชนิดเป็นแบบท่อแบนตรง สามารถใช้ได้ในความดันไม่เกิน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิสูงประมาณ 870°C โดยค่าความกะทัดรัดสูงสุดประมาณ $330 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ใช้กับกังหันแก๊ส ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

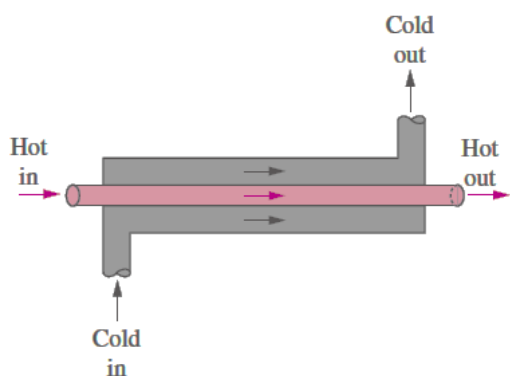
3.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Regenerative แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ แบบสถิตและแบบไดนามิกส์ โดยแบบสถิตมีลักษณะเป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนไหว ประกอบไปด้วยวัสดุพูน (หิน กรวด ทราย) ถึงแม้ความร้อนและเย็นที่ไหลผ่านจะสลับเสมอ สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง (ประมาณ $900-1500^\circ\text{C}$) ส่วนแบบไดนามิกส์ จะมีแกนที่หมุนในแนวตั้ง ซึ่งสารทำงานร้อนและเย็นสามารถผ่านเข้ามาได้โดยตรง ความร้อนจะถูกเก็บไว้และจะถ่ายเข้าไปในสารทำงานที่เย็นกว่า จะพบได้ในโรตารี Regenerator ซึ่งเป็น Ljungstrom regenerative air preheater ซึ่งถูกออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดมีความหนาแน่น $6,500 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ สามารถทนความร้อนได้ 870°C

4.แบ่งตามลักษณะการไหล

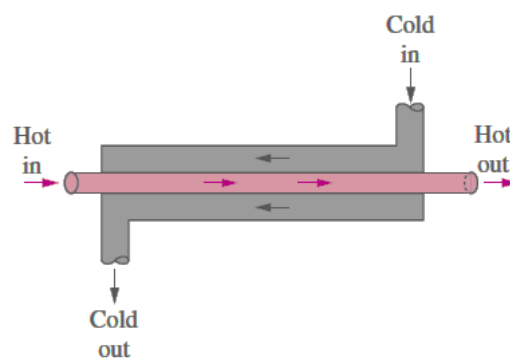
การแบ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น

4.1 การไหลแบบขนาน สารทำงานที่มีอุณหภูมิทั้งสูงและต่ำไหลเข้ามาพร้อมกันที่จุดปลายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านไปทิศทางเดียวกันและไหลออกพร้อมกัน

4.2 การไหลแบบสวนทาง สารทำงานที่มีอุณหภูมิทั้งสูงและต่ำไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางตรงข้ามกัน



(ก) การไหลแบบขนานกัน

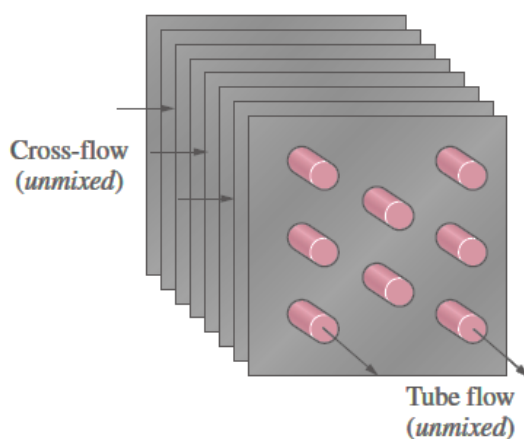


(ข) การไหลแบบสวนทางกัน

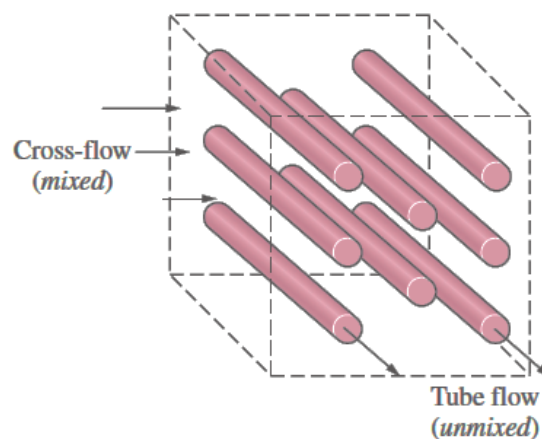
ภาพประกอบ 2 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งตามลักษณะการไหล

ที่มา: Yonus A. Cengel. Heat Transfer.

4.3 การไหลแบบตัดขวาง สารทำงานที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำ ทิศทางการไหล จะทำมุมซึ่งกันและกัน การไหลแบบนี้สามารถแยกได้เป็นแบบผสมและไม่ผสม



(ค) ติดครีปและของไหลไม่ผสมกัน

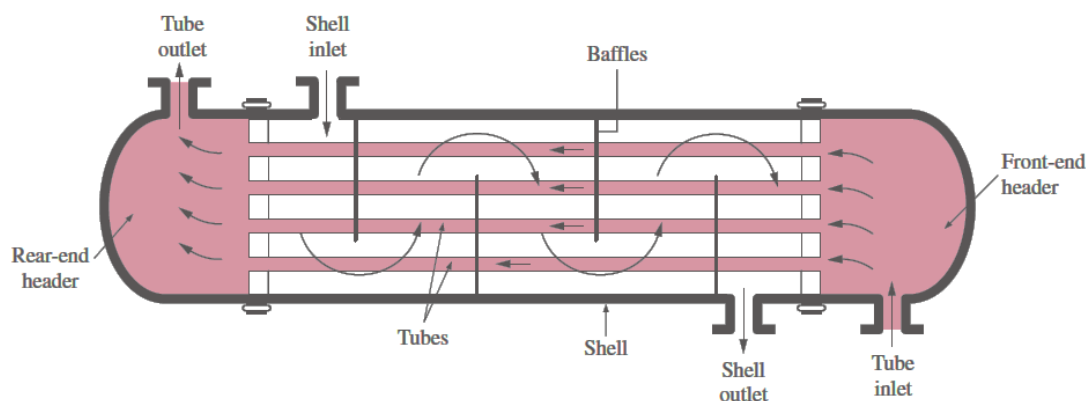


(ง) ไม่ติดครีป ของไหลไหลท่วมกลุ่มท่อ

ภาพประกอบ 3 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งตามลักษณะการไหล

ที่มา: Yonus A. Cengel. Heat Transfer.

4.4 การไหลแบบทวีคูณ (Multipass flow) เป็นกระบวนการที่อาศัยความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความร้อน เนื่องจากจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กระบวนการแบบนี้จะไม่มีรูปแบบตายตัว และมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดลักษณะการไหลแบบนี้ขึ้น



ภาพประกอบ 4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube

ที่มา: Yonus A. Cengel. Heat Transfer.

5. แบ่งตามกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อน

5.1 การพาความร้อนแบบบังคับหรือแบบอิสระของสารทำงานชนิดเดียวกัน

5.2 การเปลี่ยนสถานะ (การเดือดและการควบแน่น)

5.3 การแผ่รังสี หรือการพาและแผ่รังสีร่วมกัน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะยุ่งยากมาก เพราะค่าความต้านทานทางความร้อนตลอดระยะการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตลอด เมื่อพิจารณา ค่าความต้านทานความร้อน (R) ในการไหลในท่อ ระหว่างในท่อและนอกท่อ จะประกอบด้วยค่าความต้านทานความร้อนดังนี้

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{k A_m} + \frac{1}{A_o h_o} \quad (2-7)$$

โดยที่ A_o = พื้นที่ผิวด้านนอกท่อ, m^2

A_i = พื้นที่ผิวด้านในท่อ, m^2

$$A_m = \frac{A_o - A_i}{\ln(A_o / A_i)}, m^2$$

h_i = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อ, $W / m^2 \cdot ^\circ C$

h_o = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนนอกท่อ, $W / m^2 \cdot ^\circ C$

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ, $W / m^2 \cdot ^\circ C$

R = ค่าความต้านทานความไหลรวม, $^\circ C / W$

t = ค่าหนาของท่อ, m

ค่าความต้านทานความร้อน R จากสมการ (2-7) สามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งผิวด้านในและด้านนอกได้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U_o โดยเทียบกับผิวด้านนอกท่อ

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{1}{A_o R} \\ &= \frac{1}{(A_o / A_i)(1/h_i) + (A_o / A_m)(t/k) + 1/h_o} \\ &= \frac{1}{(D_o / D_i)(1/h_i) + (1 + (2k)) \ln(D_o / D_i) + 1/h_o} \end{aligned} \quad (2-8)$$

จาก

$$\frac{A_o}{A_m} = \frac{D_o}{2t} \ln \frac{D_o}{D_i}, D_o - D_i = 2t \quad (2-9)$$

โดยที่ D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U_i โดยเทียบกับผิวด้านในท่อ

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{A_i R} \\ &= \frac{1}{1/h_i + (A_i / A_m)(t/k) + (A_i / A_o)(1/h_o)} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{1/h_i + (1/(2t))D_i \ln(D_o/D_i) + (D_i/D_o)(1/h_o)} \quad (2-10)$$

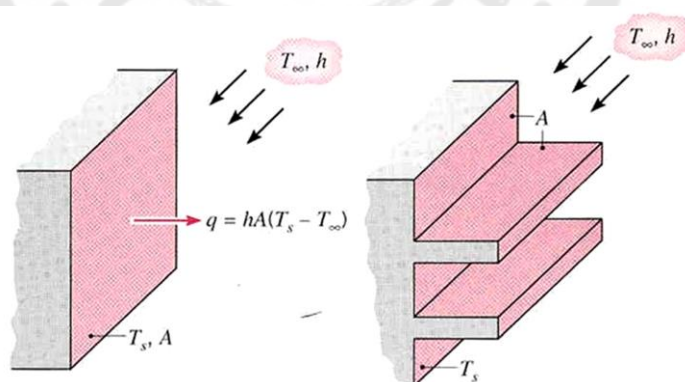
ในกรณีที่การใช้งานท่อที่เราใช้มีความหนาแน่นมาก ดังนั้นเมื่อความหนาแน่นของผลของความหนาที่มีผลต่อความต้านทานความร้อนจึงตัดทิ้งไป สมการที่ได้จะเป็น

$$U_i = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)} \quad (2-11)$$

ครีประบายความร้อน (Fin)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของของไหลสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้โดยการเพิ่มพื้นที่ที่เป็นแถบบาง ๆ ซึ่งเรียกว่า ครี

ความร้อนถ่ายเทจากท่อ หรือแผ่นวัสดุโดยการพาความร้อนของอากาศโดยส่วนใหญ่จะมีครีเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะหม้อน้ำรถยนต์เนื่องจากอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนน้อยกว่าของเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิที่ถ่ายเทผ่านครีที่มีรูปร่างต่าง ๆ



ภาพประกอบ 5 ครีความร้อนที่มีหน้าตัดคงที่

ที่มา: Yonus A. Cengel. Heat Transfer.

จะได้สมการพลังงานดังนี้

$$\left(\begin{array}{l} \text{Net rate of heat gain} \\ \text{by conduction} \times \text{direction} \\ \text{volume element } \Delta x \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Net rate of heat gain} \\ \text{by convection through} \\ \text{lateral surface} \\ \text{volume element } \Delta x \end{array} \right) \quad (2-12)$$

ความร้อนที่ได้รับสุทธิเนื่องจากการนำความร้อน

$$I = -\frac{d(Aq)}{dx} \Delta x = kA \frac{d^2 T(x)}{dx^2} \quad (2-13)$$

ความร้อนที่ได้รับเนื่องจากการพาความร้อน

$$\Pi = h[T_\infty - T(x)] \times P \times \Delta x \quad (2-14)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัด

P คือ เส้นรอบพื้นที่หน้าตัด

กำหนดให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการนำความร้อนมีค่าคงที่ จะได้

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{hP}{Ak} [T(x) - T_\infty] = 0 \quad (2-15)$$

$$\frac{d^2 \theta(x)}{dx^2} - m^2 \theta(x) = 0 \quad (2-16)$$

โดยที่ $m^2 = \frac{hP}{Ak}$ และ $\theta(x) = T(x) - T_\infty$

จากสมการที่ (2-13) เรียกว่าสมการการถ่ายเทความร้อนผ่านครีปที่มีหน้าตัด
สม่ำเสมอในหนึ่งมิติ ซึ่งรูปแบบนี้เรียกว่าสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation)

ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) และเป็นสมการอนุพันธ์สามัญอันดับสอง (Second-Order ordinary differential) การกำหนดสมการขอบเขตของครีบน้ำขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

ครีบน้ำ

เมื่อครีบน้ำยาวมาก ๆ สมมติให้ อุณหภูมิที่ปลายของครีบน้ำมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศรอบข้าง

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta(x) = 0 \quad (2-17)$$

$$\theta(x) = T_0 - T_\infty \equiv \theta_0 \quad x = 0 \quad (2-18)$$

$$\theta(x) \rightarrow 0 \quad x \rightarrow \infty \quad (2-19)$$

มีสมการคำตอบดังสมการ

$$\theta(x) = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \quad (2-20)$$

แก้สมการหาค่าคงที่จะได้

$$C_2 = 0$$

$$C_1 = \theta_0$$

ดังนั้น

$$\frac{\theta(0)}{\theta_0} = \frac{T(x) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-mx} \quad (2-21)$$

ครีบน้ำไม่พิจารณาการสูญเสียความร้อนที่ปลาย

เมื่อเราสมมุติ การสูญเสียความร้อนที่ปลายครีบน้ำให้มีค่าน้อยมาก

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} - m^2\theta(x) = 0 \quad (2-22)$$

สมการขอบเขต

$$\theta(x) = T_0 - T_\infty \equiv \theta_0 \quad x = 0 \quad (2-23)$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = 0 \quad x = L \quad (2-24)$$

มีสมการคำตอบดังนี้

$$\theta(x) = C_1 \cosh(m(L-x)) + C_2 \sinh(m(L-x)) \quad (2-25)$$

แก้สมการหาค่าคงที่จะได้

$$\begin{aligned} C_2 &= 0 \\ C_1 &= \theta_0 / \cosh(mL) \end{aligned} \quad (2-26)$$

ดังนั้น

$$\frac{\theta(x)}{\theta_0} = \frac{T(x) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)} \quad (2-27)$$

ครีปที่มีการพาความร้อนที่ปลายครีป

เมื่อเราสมมุติให้มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนที่ปลายครีป

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} - m^2\theta(x) = 0 \quad (2-28)$$

สมการขอบเขต ดังสมการ

$$\theta(x) = T_0 - T_\infty \equiv \theta_0 \quad x = 0 \quad (2-29)$$

$$k \frac{d\theta(x)}{dx} + h_e \theta(x) = 0 \quad x = L \quad (2-30)$$

มีสมการคำตอบดังนี้

$$\theta(x) = C_1 \cosh(m(L-x)) + C_2 \sinh(m(L-x)) \quad (2-31)$$

จากสมการขอบเขตทั้งสองจะได้

$$\theta = C_1 \cosh(mL) + C_2 \sinh(mL) \quad (2-32)$$

และ

$$0 = -kC_2 m + h_e C_1 \quad (2-33)$$

ดังนั้น

$$\frac{\theta(x)}{\theta_0} = \frac{T(x) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{\cosh(m(L-x)) + \left(\frac{h_e}{mk}\right) \sinh(m(L-x))}{\cosh(mL) + \left(\frac{h_e}{mk}\right) \sinh(mL)} \quad (2-34)$$

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านครีปสามารถหาได้จากสมการ

$$Q = -Ak \left. \frac{d\theta(x)}{dx} \right|_{x=0} \quad (2-35)$$

$$Q = Ak\theta_0 m = \theta_0 \sqrt{PhAk} \frac{\sinh(mL) + \left(\frac{h_e}{mk}\right) \cosh(mL)}{\cosh(mL) + \left(\frac{h_e}{mk}\right) \sinh(mL)} \quad (2-36)$$

ประสิทธิภาพของครีป

จากสมการที่ผ่านมา เราพิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านครีปที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ แต่ว่าในการใช้งานจริง ๆ นั้นครีปที่ใช้นั้นมีรูปร่างต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 6 ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\text{Actual heat transfer though fin}}{\text{Ideal heat transfer though fin}} = \frac{Q_{fin}}{Q_{ideal}} \quad (2-37)$$

if entire fin surface were at fin base temperature T_0

จาก

$$Q_{ideal} = a_f h \theta_0 \quad (2-38)$$

โดยที่ a_f คือ พื้นที่ของครีป

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

θ_0 คือ $T_0 - T_\infty$

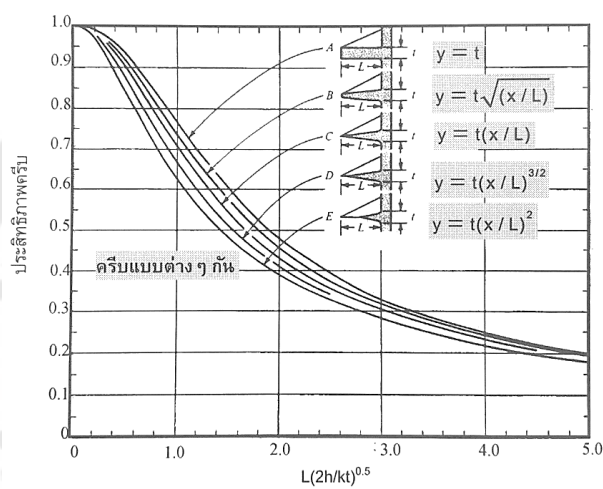
$$Q_{fin} = \eta Q_{ideal} = \eta a_f h \theta_0 \quad (2-39)$$

จากภาพประกอบ 6 และ 7 แสดงประสิทธิภาพของครีปและตัวแปร $L\sqrt{2L/kt}$ ที่มีรูปร่างต่าง ๆ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงนั้น ไม่ได้ถ่ายเทเนื่องจากครีปอย่างเดียว เพราะว่ช่องว่างระหว่างครีปก็สามารถถ่ายเทความร้อนได้ ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทนั้นประกอบด้วย

$$\begin{aligned}
 Q_{total} &= Q_{fin} + Q_{unfin} \\
 &= \eta a_f h \theta_0 + (a - a_f) h \theta_0
 \end{aligned}
 \quad (2-40)$$

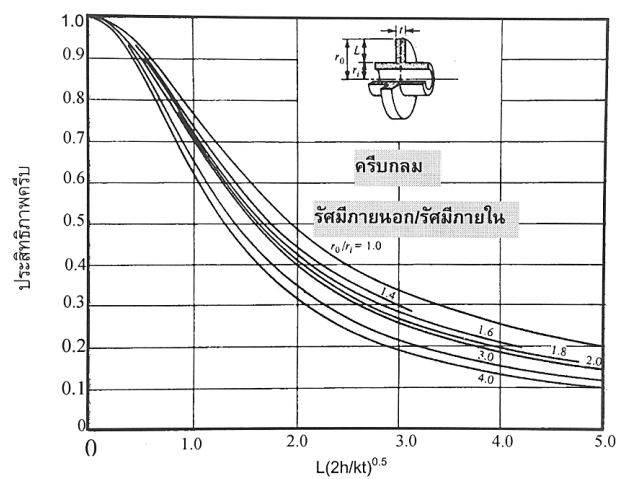
โดยที่ a คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

$$Q_{total} = [\eta\beta + (1 - \beta)] ah\theta_0 \equiv \eta' ah\theta_0 \quad (2-41)$$



ภาพประกอบ 6 ประสิทธิภาพของครีปโดยระยะความหนาของครีปเปลี่ยนแปลงกับระยะ x

ที่มา: ไพศาล นาผล. การถ่ายเทความร้อนและการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. (2558).



ภาพประกอบ 7 ประสิทธิภาพภาพของครีบบัณฑิตที่มีความหนาแน่น

ที่มา: ไพศาล นาคผล. การถ่ายเทความร้อนและการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. (2558).

ตัวเลขบีโธ (Biot number, Bi)

การเลือกใช้วัสดุของครีบบัณฑิตเพื่อช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิว ควรเลือกวัสดุที่มีการนำความร้อนสูงหรือมีตัวเลขบีโธต่ำ ๆ $Bi \ll 1.0$ โดยที่

$$Bi = \frac{Ah}{Pk} \quad (2-42)$$

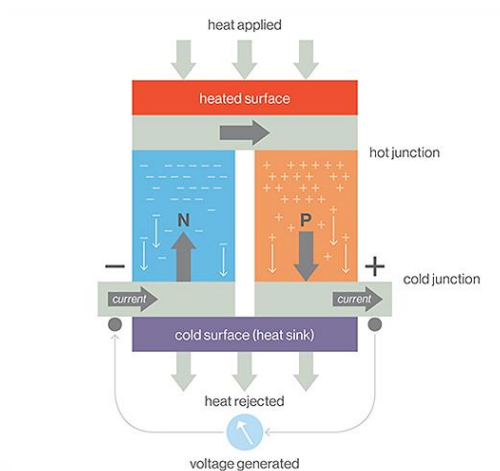
สำหรับครีบบัณฑิตสี่เหลี่ยม พบว่า $P/A = 2/t$ ดังนั้น

$$Bi = \frac{h}{2k/t} \quad (2-43)$$

จากสมการ (2-41) จะพบว่า การใช้ครีบบัณฑิตที่จะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นสัมพันธ์กับการพาความร้อนที่ผิวของครีบบัณฑิต จะต้องน้อยกว่าสภาพการนำความร้อนของครีบบัณฑิตมาก ๆ

เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric)

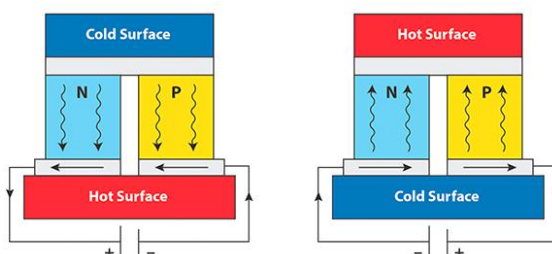
คือการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นอุณหภูมิ ปรากฏการณ์ Peltier–Seebeck ร่วมกับปรากฏการณ์ของ Thompson เป็นผลมาจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์ กล่าวคือเทอร์โมอิเล็กทริกส์เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของความร้อนเป็นไฟฟ้า (Seebeck effect) ความสามารถในการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพและศักยภาพนั้น จึงทำให้ระบบการระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นได้รับความสนใจจากคนทั่วโลกมากขึ้น จากภาพประกอบ 8 เนื่องจากกลุ่มอิเล็กตรอนในโลหะด้านร้อนจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าโลหะด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า จึงทำให้เกิดความแตกต่างปริมาณของอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะดังกล่าว Seebeck ได้สรุปว่าความแตกต่างอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Seebeck effect



ภาพประกอบ 8 ปรากฏการณ์ซีแบค

ที่มา: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Seebeck-effect>

ต่อมา Jean Peltier ได้ทำการทดลองส่งกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในทองแดงและบิสมัทที่เชื่อมต่อกัน ผลที่เกิดขึ้น คือ ระหว่างโลหะทองแดงและบิสมัทข้างหนึ่ง จะเกิดความร้อน ส่วนอีกข้างหนึ่งจะร้อน อันเป็นผลจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด กลุ่มอิเล็กตรอนที่เคลื่อนตัวผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปล่อยพลังงานความร้อน (Heat evolved) แต่อีกด้านหนึ่งนั้นจะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 9 เรียกว่า Peltier effect และ Peltier จะเห็นว่าปรากฏการณ์ทั้งสองนั้นเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้เกิดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่สามารถทำงานย้อนกลับ (Reverse operation) กันได้



ภาพประกอบ 9 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

ที่มา: <https://icecube.com/technical/thermoelectrics-peltier-effect-described>

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์

จากผลการวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำ จึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นจะมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

1. สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าได้สูง แต่จะเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
 2. สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นความเย็นได้
 3. มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อที่จะป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ
- คุณสมบัติทั้ง 3 ข้อนี้ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการที่ 2-44 สำหรับสมการที่ใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของวัสดุ (Z) คือ

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\gamma} \quad (2-44)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์ Seebeck (volt / kelvin)

σ คือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampare / Volt * meter)

γ คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt / meter * Kelvin)

เนื่องจาก Z มีหน่วยต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่าบ่งชี้ที่แท้จริงที่ไม่มีหน่วยเพื่อที่จะเปรียบเทียบกันได้ง่าย ดังนั้นต้องคูณสมการ 2.44 ด้วย T จะได้สมการใหม่เป็น ZT โดยที่ T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน ค่า ZT จึงเป็นค่า figure-of-merit ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการ เปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และคุณสมบัติของการทำความเย็นของวัสดุที่ใช้ผลิต ชิ้นส่วนและองค์ประกอบ (Thermo- element) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์

การทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์

ปัจจุบันวิวัฒนาการของ Seebeck effect และ Peltier effect ได้มีการพัฒนาให้กลายเป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ทำงานตามกระบวนการอุณหพลศาสตร์ใน 2 รูปแบบ คือ จักรกลความร้อน (Heat engine) และจักรกลสูบความร้อน (Heat pump) โดยมีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แยกชนิดตามหน้าที่ในการทำงานดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ผลิตไฟฟ้าได้จากการทำความร้อน (Seebeck effect) เรียกว่า Thermoelectric Generator (TEG)

2. อุปกรณ์ทำความเย็น (Peltier effect) เรียกว่า Thermoelectric Cooler (TEC) หรือ Peltier cooler

เทอร์โมอิเล็กทริกส์เจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator)

เป็นการให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากพฤติกรรมรอยต่อโอห์มมิก (Ohmic junction) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์เจเนอเรเตอร์ อาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุด้านร้อนมีพลังงานจลน์สูงกว่าวัสดุด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณของประจุไฟฟ้าและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขั้วต่อของอุปกรณ์ พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปให้โหลด (Load) ดังแสดงภาพประกอบ 8 และเนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์เจเนอเรเตอร์นั้นผลิตไฟฟ้าจากการได้รับพลังงานความร้อนบางครั้งจึงเรียกว่า เซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell)

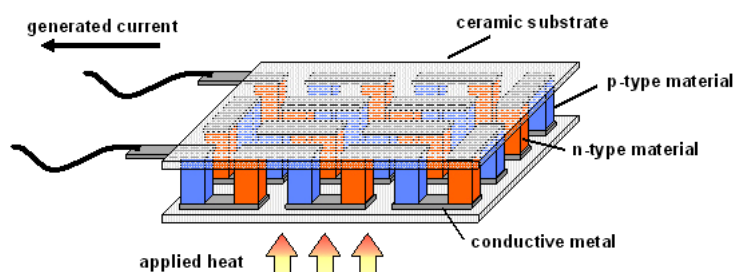
เทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler)

เป็นการทำความเย็นด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่บริเวณรอยต่อโอห์มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ (TEC) อาศัยผลการดูดกลืนพลังงานความร้อนของกลุ่มอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากด้านเย็นผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกส์ และนำไปปล่อยที่ด้านร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งจะมีผลให้ด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ (TEC) มีอุณหภูมิลดลง แต่จะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้และการระบายความร้อนที่ด้านร้อนออก ดังภาพประกอบ 9

โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์

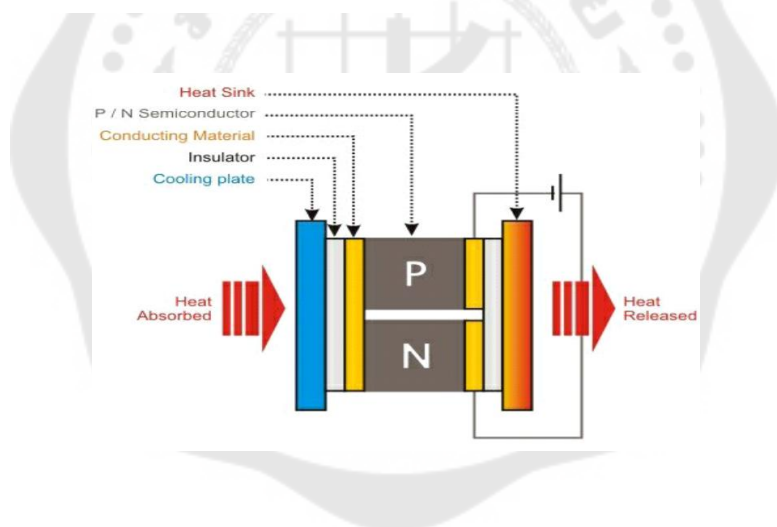
เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) ที่ผลิตกันในเชิงพาณิชย์ จะมีมาตรฐานการกำหนดข้อมูลเฉพาะ (Specification) ทั้งขนาดพื้นที่ รูปร่าง และกำลังไฟฟ้าของเซลล์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายตามวัตถุประสงค์ ซึ่งตรงข้ามเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองขั้วนั้น มาจากวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ เราเรียกกันว่า โมดูล (module) ซึ่งเจ้าโมดูลนี้ แบ่งเป็นสองขั้ว ด้วยกันคือ ฝั่งหนึ่งจะเป็น สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (N-Doped) ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็นนี้ จะมีประจุส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน และ ประจุส่วนน้อย เป็นโฮล ซึ่งหมายความว่า ฝั่งชนิดเอ็นนี้ มีขั้วเป็นลบ และในทางตรงกันข้าม วัสดุสารกึ่งตัวนำฝั่งพี (P-Doped) จะมีพาหะประจุส่วนมากเป็นโฮล และ พาหะประจุส่วนน้อยเป็น อิเล็กตรอน นั่นหมายความว่า ตัวนำฝั่งพีนั้น จะมีขั้วเป็นบวก เมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแผ่นเซรามิก ทั้งบนและล่าง หลังจากนั้นจะเกิดการไหลจาก ประจุลบ ไปยัง ประจุบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกแบบครบวงจร เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็น (P type - N type) จะถูกนำมาจัดเรียงบนแผ่นฉนวนไฟฟ้าต่อสลับกันทางวงจรไฟฟ้า และต่อขนานกันในเชิงวงจรความร้อนบนพื้นที่กว้าง ทั้งนี้เพื่อให้มีทิศ

ทางการเคลื่อนที่ของพาหะไฟฟ้าที่สอดคล้องกับการเกิดปรากฏการณ์ Peltier effect เป็นการสร้างรอยต่อไอทึมมิกที่ผนังอุปกรณ์ด้านร้อนและด้านเย็น ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 โมดูลไฟฟ้าพลังความร้อน

ที่มา: <https://www.digikey.com>



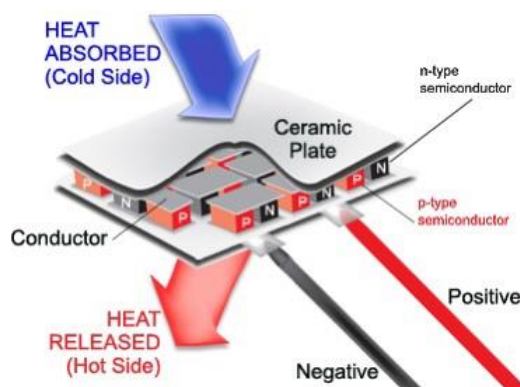
ภาพประกอบ 11 โครงสร้างบริเวณรอยต่อที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น

ที่มา: <https://research-system.siam.edu>

การทำความเย็นและการผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์

ระบบการทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้นจะแตกต่างจาก ระบบทำความเย็นแบบอัดไอเคมี (Compression) เนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ไม่ต้องใช้สารทำความเย็น และไม่มีเสียงรบกวน การทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้น ต้องการแค่

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า พร้อมกับระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนของแผ่น ตามภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกส์คูลเลอร์ การทำความเย็นด้วยแผ่น TEC

ที่มา: www.electoday.com

ของไหลนาโน (Nanofluids)

คือ นวัตกรรมใหม่ของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ทำได้โดยการใส่อนุภาคของของแข็งที่มีขนาดต่ำกว่า 50 นาโนเมตร (เล็กกว่าเส้นผมของคน ประมาณ 1000 เท่า) ลงไปในของไหลพื้นฐาน (Base fluid) อนุภาคที่ใส่ลงไปนี้จะลอยตัวอยู่ได้ในของไหล โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Brownian motion” ของไหลนาโนถูกพัฒนาขึ้นมาพร้อมกับความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี โดยที่ Steve Choi (1995) แห่ง Argonne National Laboratory ที่สหรัฐอเมริกา เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน เป็นที่ทราบกันดีว่าอนุภาคของของแข็งที่ใส่ลงไปนั้น มีค่าความสามารถในการนำความร้อนที่สูงกว่าของไหลทั่วไปหลายเท่า ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องนั้น ทองแดงมีค่าความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าน้ำประมาณ 700 เท่า และมากกว่าน้ำมันเครื่องยนต์ประมาณ 3000 เท่า ดังนั้น ของไหลนาโนได้รับความคาดหวังว่า จะเพิ่มค่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและนำมาใช้แทนของไหลธรรมดาทั่วไป โดยไม่ทำให้กำลังงานปั๊ม (Pumping power) เพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติทั่วไปนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 2 เท่า จะต้องเพิ่มกำลังงานปั๊มให้สูงขึ้นประมาณ 10 เท่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าของไหลนาโนนั้นช่วยลดกำลังงานปั๊มได้มาก และยังทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีขนาดและน้ำหนักลดลงด้วย

จากแนวคิดที่ว่า ของแข็งมีค่าความสามารถในการนำความร้อนได้ดีกว่าของเหลว นักวิจัยจึงได้นำของแข็งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรใส่ลงไปของไหลทำงานพื้นฐาน เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน จากงานวิจัยในวารสารนานาชาติได้มีผู้สนใจการหาค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน โดยที่ในปี ค.ศ. 2001 Eastman และคณะได้ทดลองด้วยวิธี Transient hot-wire เพื่อหาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของทองแดงที่ใส่ลงในเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และได้พบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐาน ในขณะที่ ในปี ค.ศ. 2005 Murshed และคณะได้ทดลองหาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น 33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐาน และเมื่อไม่นานมานี้ ในปี ค.ศ. 2009 Duangthongsuk และ Wongwises ได้ทำการศึกษาเชิงทดลอง หาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐาน ผลงานวิจัยของการหาค่าการนำความร้อนที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของของไหลทำงานหลังจากใส่อนุภาคนาโนลงไป

การเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลนาโน (Nanofluids)

การที่สารทำงานมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำนั้นจะทำให้การเกิดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ดี แม้ว่าจะมีการใช้เทคนิคมากมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนก็ตาม การพัฒนาคุณสมบัติทางความร้อนให้กับของไหลที่ทำหน้าที่ระบายความร้อน อาจเป็นอีกวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ วิธีการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหล คือ การผสมผงอนุภาคของแข็งเข้ากับของไหล เช่น โลหะ อโลหะ และสารโพลีเมอร์ ที่สามารถผสมกับของไหลเพื่อให้ของไหลเข้มข้นได้ ค่าการนำความร้อนของของไหลที่มีการผสมอนุภาคเหล่านี้ ถูกคาดว่าจะมีค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าของไหลธรรมดา ซึ่งผลของปริมาณอนุภาคคิดเป็นปริมาตร, ขนาด, อัตราการไหล, Pressure drop ของสารผสมนี้ และพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนได้ถูกศึกษาไว้ด้วย ซึ่งการนำวิธีการที่ได้กล่าวไว้ไปใช้นั้น อนุภาคที่ถูกแขวนลอยอยู่จะมีเกลอยู่หน่วย ไมโครเมตร (μm) หรือ มิลลิเมตร (mm) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กล่าวมานั้นอาจจะทำให้เกิดปัญหา เช่น การสึกกร่อน และการอุดตันเกิดขึ้น ดังนั้น ของไหลที่ผสมด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้น้อยมากในการเพิ่มขีดความสามารถการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ

การผลิตของไหลนาโน (Nanofluids)

วิธีการที่ใช้ในการผลิตอนุภาคของแข็งที่ใช้สำหรับของไหลนาโนนั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ One-step method และ Two-step method ตามลำดับ สำหรับกระบวนการ One-step method นั้น ทำได้โดยการให้ความร้อนกับอนุภาคของโลหะภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) เพื่อให้โลหะนั้นกลายเป็นไอ โดยที่ห้องสุญญากาศนั้นจะมีของไหลสำหรับการหล่อเย็นอยู่บริเวณผนังด้านในของห้อง และเมื่อไอของโลหะมาสัมผัสกับของไหลหล่อเย็นนี้ก็จะเกิดการควบแน่น ก่อให้เกิดเป็นอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ภายในของของไหลหล่อเย็น วิธีการนี้จะทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็ก ไม่มีการเกาะกันของอนุภาค กระจายตัวได้ดี สำหรับวิธีที่สองนั้นทำได้โดยใช้ การควบแน่นของแก๊สเฉื่อย และนำไปกระจายลงในของไหลอีกทีหนึ่ง วิธีการนี้เหมาะสำหรับการผลิตออกไซด์ของอนุภาคนาโน นอกจากนั้นยังสามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพง แต่มีการเกาะกันของอนุภาคเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ One-step method

การประยุกต์ใช้ของไหลนาโน (Nanofluids)

อนุภาคนาโนทำให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะมีคุณสมบัติที่ต่างจากตอนที่อยู่ในสถานะของแข็งธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วอนุภาคนาโนนี้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าและยังมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ได้มีนักวิจัยมากมายพยายามผสมอนุภาคนาโนลงในของไหลต่าง ๆ เพื่อสร้างของไหลหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน Choi เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้คำว่า “Nanofluids” บ่งบอกถึงของไหลที่มีอนุภาคนาโนแขวนลอยอยู่ ผลการทดลองส่วนหนึ่งแสดงให้เห็นค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น ประมาณ 60 % ซึ่งได้จากของไหลนาโนที่ประกอบด้วยน้ำและอนุภาคนาโน 5 Vol % ของ CuO

การผสมอนุภาคนาโนในสารหล่อเย็น ในระบบทำความร้อน หรือ ระบบทำความเย็น สามารถเพิ่มคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างมาก เหตุผลสามารถแบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มพื้นที่ผิว และความจุความร้อนของของไหล
2. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนให้กับของไหล
3. ปฏิกริยาการชนกันท่ามกลางอนุภาคของไหลและการไหลผ่านผิวหน้าจะเกิดขึ้นรุนแรงและหนาแน่นมากขึ้น
4. การเปลี่ยนแปลงการผสมกันและความปั่นป่วนจะรุนแรงมากขึ้น
5. การกระจายตัวของอนุภาคนาโนจะทำให้อุณหภูมิของของไหลเท่ากันทั่ว

ทุกตำแหน่ง

ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluids)

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นของไหลนาโนจะแสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลธรรมดา หนึ่งในสาเหตุนั้นคือ การแขวนลอยของอนุภาคนาโนอย่างดีจะไปเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนนั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน เป็นเวลานานแล้วที่การพัฒนาทฤษฎีที่สลับซับซ้อน ในการทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนเป็นปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ แต่ยังคงมีการคำนวณความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกิดจากประสบการณ์ เพื่อที่จะคำนวณค่าการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ (two phase mixture)

$$k_{eff} = \frac{k_p p \alpha_p \left(\frac{dT}{dx} \right) p + k_f \alpha_f \left(\frac{dT}{dx} \right) f}{\alpha_p \left(\frac{dT}{dx} \right) p + \alpha_f \left(\frac{dT}{dx} \right) f} \quad (2-45)$$

Hamilton และ Crosser เสนอแบบจำลองของของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งมี อัตราส่วนของค่าการนำความร้อน ของทั้งสองสมการที่มากกว่า 100

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha(k_f - k_p)} \quad (2-46)$$

$$n = \frac{3}{\phi} \quad (2-47)$$

โดยที่ k_p คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาค

k_f คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล

α คือ สัดส่วนปริมาตรของอนุภาค

η คือ ตัวประกอบรูปร่างที่เกิดจากการทดลองกำหนดให้เป็น

ϕ คือ ค่าความกลม ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ อนุภาคนั้น เทียบกับพื้นที่ผิวกลมจริงๆ ของอนุภาค

อีกทางเลือกหนึ่งในการคำนวณหาประสิทธิภาพค่าการนำความร้อนของ Solid-Liquid mixture ได้ถูกแสดงโดย Wasp

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\alpha(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \alpha(k_f - k_p)} \quad (2-48)$$

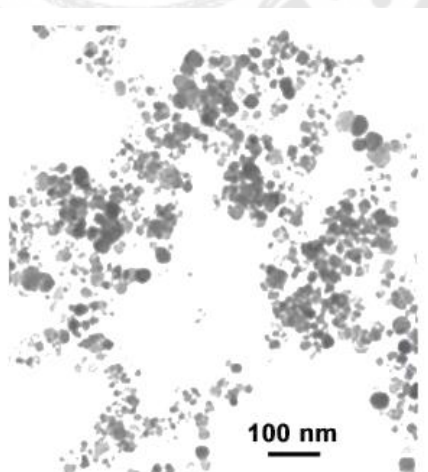
สัดส่วนปริมาตร α ของอนุภาคสามารถหาได้จาก

$$\alpha = \frac{v_p}{v_f + v_p} = m \frac{\pi}{6} \bar{d}_p^3 \quad (2-49)$$

โดยที่ m คือ ปริมาณของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร

$\bar{d}_p$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของอนุภาค

การเปรียบเทียบระหว่างสมการ (45) และ (48) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Wasp เป็นกรณีพิเศษ ที่ค่าความกลม (Sphericity) เท่ากับ 1.0 ในแบบจำลอง Hamilton และ Crosser



ภาพประกอบ 13 อนุภาคของของไหลเฟอร์ไร Fe_3O_4 ขนาด 20 – 30 นาโนเมตร

ที่มา: <https://ssnano.com>

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติของผงอนุภาคเฟอร์ไรต์ Fe_3O_4

นาโนเฟอร์ไรต์ (Fe_3O_4)	คุณสมบัติ
ขนาดอนุภาค	23 nm
สี	ดำ
ความหนาแน่น	5180 kg / m ³
พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก	39 m ²
ค่าการนำความร้อน	9.7 W / m.K
มวลโมเลกุล	231.53 g / mol
จุดเดือด	2623 °C
จุดหลอมเหลว	1538 - 1597 °C
ความร้อนจำเพาะ	670 J / kg

ความหนาแน่นของของไหลนาโน

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (2-50)$$

โดยที่ ρ_{nf} คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน (kg / m³)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน (kg / m³)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m³)

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

$$C_{P_{nf}} = \phi C_{P_p} + (1 - \phi) C_{P_w} \quad (2-51)$$

โดยที่ $C_{P_{nf}}$ คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน (J / kg · K)

C_{P_p} คือ ความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน (J / kg · K)

C_{p_w} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J / kg \cdot K$)

ค่าความหนืดสัมบูรณ์

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi) \mu_w \quad (2-52)$$

โดยที่ μ_{nf} คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลนาโน ($kg / m \cdot s$)

μ_w คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ ($kg / m \cdot s$)

ค่าการนำความร้อน

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + 2\phi(k_w - k_p)} \right] k_w \quad (2-53)$$

โดยที่ k_{nf} คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน ($w / m \cdot k$)

k_p คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน ($w / m \cdot k$)

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ ($w / m \cdot k$)

อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{nf} = m_{nf} C_{P_{nf}} (T_{in} - T_{out})_{nf} \quad (2-54)$$

โดยที่ Q_{nf} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน (w)

m_{nf} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลนาโน (kg / s)

$C_{P_{nf}}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ($J / kg \cdot K$)

$T_{in,nf}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าของของไหลนาโน ($^{\circ}C$)

$T_{out,nf}$ คือ อุณหภูมิขาออกของของไหลนาโน ($^{\circ}C$)

การไหลเป็นจังหวะ (Pulsating Flow)

คำว่า "การไหลแบบเป็นจังหวะ" เป็นการไหลเนื่องจากการซ้อนทับแบบเป็นจังหวะขององค์ประกอบเป็นระยะๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นค่าผลรวมคงที่ได้และถูกนำไปใช้กับกฎของความเร็วหรือกฎของแรงดันได้ การไหลเกิดขึ้นในระบบทางเทคนิคและการใช้งานด้านวิศวกรรม โดยเกิดจากการปรากฏตัวของจังหวะและการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ทางไดนามิก ในพารามิเตอร์การไหลของเหลวมักจะเกิดขึ้นได้ง่ายโดยปั๊มและคอมเพรสเซอร์, การสั่นของท่อและวาล์วควบคุมการไหล รวมทั้งการแยกการไหลที่อยู่เบื้องหลังสิ่งกีดขวางในท่อร้อยสาย ระบบการไหลแบบเป็นจังหวะสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบในปั๊มหรือชุดกำเนิดการไหลแบบเป็นจังหวะต่างๆ ซึ่งในหลากหลายกรณีสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น พลังงาน, เคมี, ยานยนต์, ยา, อุตสาหกรรมอาหาร ทั้งนี้ในการทำให้เกิดการไหลแบบเป็นจังหวะนี้ ทำขึ้นเพื่อใช้ในการหาประสิทธิภาพสูงสุดในการระบายความร้อนด้วยของไหลนาโนในเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยการใช้ปั๊มรีดท่อ (peristaltic pump) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

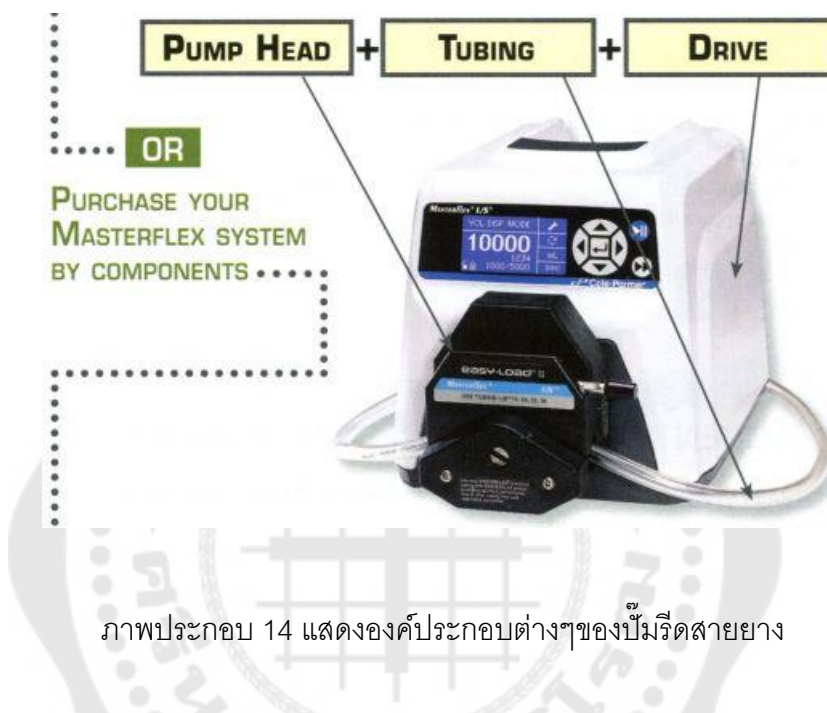
ปั๊มรีดท่อ (peristaltic pump)

ปั๊มรีดท่อหรือปั๊มรีดสายยางเป็นปั๊มขนาดเล็ก ทำงานโดยใช้ลูกกลิ้งกดรีดท่อที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นในการผลักดันให้ของเหลวไหลไปข้างหน้า ดังนั้นความสามารถในการผลิตแรงดันของปั๊มจึงขึ้นอยู่กับวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ทำท่อ การปรับอัตราเร็วในการปั๊มจะใช้การปรับความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งกดรีดท่อเป็นหลัก ปั๊มนี้นักใช้ในงานขนาดเล็ก เช่น ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์, อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือ ใช้กับระบบที่ต้องการเติมสารในปริมาณน้อยๆ แต่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำ

การทำงานของปั๊มรีดท่อ คือ เมื่อติดตั้งระบบควบคุม มอเตอร์ขับเคลื่อนให้ปั๊มรีดสายยางทำงาน ของเหลวที่บรรจุอยู่ในถังเก็บผลิตภัณฑ์ จึงไหลลงมาตามท่อสายยางผ่านหัวบรรจุและบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ต่อไป โดยปั๊มจะทำการหมุนตัวลูกกลิ้งไปกดที่สายยางแล้วกดเอาของเหลวให้เคลื่อนที่ไปตามลูกกลิ้งโดยสายยางจะอยู่ที่เดิม ดังนั้น เมื่อหมุนลูกกลิ้งไปเรื่อย ๆ ของเหลวก็จะสามารถย้ายจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับสิ่งใดเลยนอกจากสายยาง ความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของของเหลวขึ้นกับจำนวนของลูกกลิ้งที่ใช้ในการหมุน ยิ่งมากจะมีความแม่นยำมาก และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสายยาง

ปั๊มรีดสายยางต้องทราบวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ต้องระบุให้ได้ว่านำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการหรืองานอุตสาหกรรม จากนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ค่าปริมาตรที่ต้องการค่าความเร็วรอบ จำนวนช่องการไหลที่ต้องการ และค่าความถูกต้องแม่นยำที่ยอมรับได้ แล้วจึงมาทำการเลือก series ตามการใช้งาน นอกจากนี้ การเลือกสายยางก็เป็นสิ่งที่จำเป็น ความ

หนาของผนังสายยางขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความทนทานต่อสารเคมี แสงยูวี รวมไปถึงจนถึง การทำความสะอาดสายยาง หลักการใช้งาน โดยผู้ใช้สามารถเลือกขนาดสายยางได้ตามความต้องการ ซึ่งมีให้เลือกหลายขนาด



ภาพประกอบ 14 แสดงองค์ประกอบต่างๆของปั๊มรีดสายยาง

ที่มา: coverscience.biz/index.php?lay=show&ac=article&Id=538805010

ข้อดีของปั๊มรีดสายยาง

1. Peristaltic filling machine ใช้กับสารที่มีอนุภาคหรือมีสารแขวนลอยได้
2. สามารถล้างออกได้ง่าย โดยทำความสะอาดเฉพาะส่วนสายยาง
3. สามารถใช้กับสารที่มีความหนืดสูงได้ โดยสารจะผ่านเฉพาะส่วนสายยาง เท่านั้น
4. สามารถใช้ได้กับอาหารที่ปลอดภัย
5. มีความแม่นยำในการดูดและการจ่ายสูง

แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

แม่เหล็ก

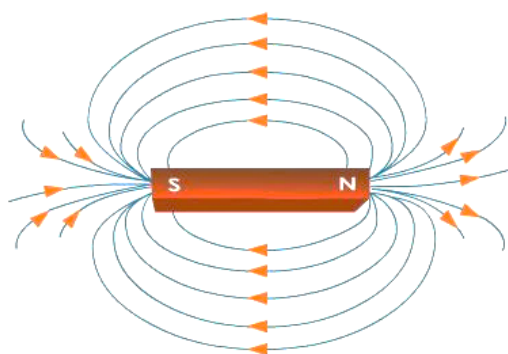
สารแม่เหล็กที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ สามารถมีแรงกระทำต่อสารแม่เหล็กด้วยกันได้ เมื่อแขวนแม่เหล็กอย่างอิสระขั้วเหนือ (N) จะชี้ทิศขั้วโลกเหนือ ขั้วใต้ (S) จะชี้ทิศขั้วโลกใต้ ทำให้เชื่อว่าโลกมีอำนาจแม่เหล็ก โดยขั้วเหนือ (N) ของแม่เหล็ก อยู่ทางขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์ และมีขั้วใต้ (S) ของแม่เหล็กอยู่ทางขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์ โดยมีการทำมุมกันเล็กน้อย

สนามแม่เหล็ก

เมื่อนำแท่งแม่เหล็กไปดูดผงตะไบเหล็ก ผงตะไบเหล็กจะถูกดูดติดกับส่วนต่างๆ ของแท่งแม่เหล็ก และอยู่ใกล้ปลายแท่งแม่เหล็ก บริเวณดังกล่าว เรียกว่า ขั้วแม่เหล็ก

ถ้าใช้เชือกผูกกึ่งกลางแท่งแม่เหล็ก แล้วแขวนแท่งแม่เหล็กนี้ให้อยู่ในแนวราบ จะพบว่าแท่งแม่เหล็ก จะวางตัวอยู่ในแนวทิศเหนือและทิศใต้ เราเรียกขั้วแม่เหล็กที่ชี้ไปทิศเหนือว่าขั้วเหนือ และขั้วที่ชี้ไปทางทิศใต้ว่าขั้วใต้

สนามแม่เหล็ก เมื่อมีแม่เหล็กวางอยู่ ณ ที่ใดก็ตาม แม่เหล็กนั้นจะส่งอำนาจแม่เหล็กออกไปรอบตัวในบริเวณนั้น ถ้าเอาแม่เหล็กอื่นหรือวัตถุที่เป็นเหล็กเข้าไปในบริเวณนั้นจะเกิดแรงแม่เหล็กส่งมากระทำทันทีจากแม่เหล็กที่วางอยู่ก่อนนั้น อย่างนี้เราถือว่าแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กที่เราเอาเข้าไปที่หลังไปอยู่ในบริเวณซึ่งเป็น สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กอันแรกถ้าเราถอยแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กนั้นออกมาให้ห่างมาก ๆ แรงแม่เหล็กที่เคยเกิดขึ้นดังกล่าวจะหมดไปหมายความว่า แม่เหล็กอันแรกส่งแรงไปกระทำไม่ถึง จึงเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กคือ บริเวณรอบ ๆ แม่เหล็ก ซึ่งแท่งแม่เหล็กนั้นสามารถส่งอำนาจแม่เหล็กไปถึง



ภาพประกอบ 15 รูปแสดงเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้ว N เข้าหาขั้ว S

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange battery)



(ก) cylindrical

(ข) pouch



(ค) prismatic

ภาพประกอบ 16 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (ก) cylindrical (ข) pouch และ (ค) prismatic

ที่มา : <http://en.mottcell.com/products-detail/rechargeable-li-ion-battery>

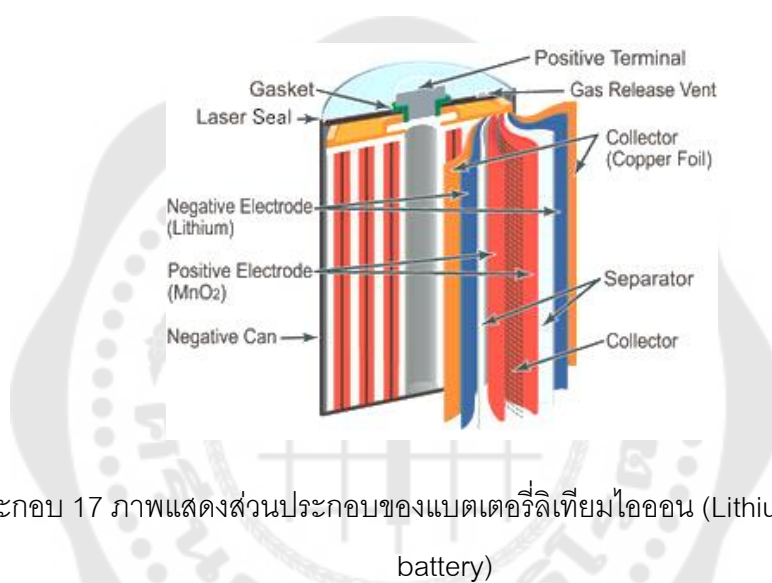
ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange batter)

ขั้วไฟฟ้าซึ่งประกบด้วยขั้วแคโทด (cathode) มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนเคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง เช่น แกรไฟต์เคลือบบนแผ่นทองแดง และขั้วแอโนด (anode) มีองค์ประกอบเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม

แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ (separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจรของกระแส ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็น พอลิ-โพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นต้น

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียมในสารละลายต่าง ๆ เช่น ลิเทียมเตตระฟลูออโรโบรไมด์ (LiBF_4) ในสารละลายเอทิลีนคาร์บอนเนต ลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต (LiPF_6) ในสารละลายไดเอทิลคาร์บอนเนต ลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต (LiPF_6) ในสารละลายไดเมทิลคาร์บอนเนต เป็นต้น โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนของลิเทียมและอิเล็กตรอนของขั้วบวกและขั้วลบ

ตัวรับกระแส (current collector) หรือโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอกและเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้



ภาพประกอบ 17 ภาพแสดงส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion exchange battery)

ที่มา : <http://makble.com>

วัสดุสำหรับทำขั้วแคโทด

ความสามารถในการกักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วแคโทดและแอโนดเป็นสำคัญ โดยวัสดุต่างชนิดที่มีโครงสร้างต่างกันจะมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้ต่างกัน โครงสร้างผลึกของวัสดุสำหรับทำขั้วแคโทดในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ประเภท คือ

ประเภทเลเยอร์ (layered structure, LiMO_2) เช่น LiCO_2 , LiNiO_2 , $\text{LiCO}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}$, $\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$

ประเภทสปินเนล (spinel structure) เช่น LiMnO_2 , LiMO_2

ประเภทโอลิวีน (Olivine structure, LiMPO_4) เช่น LiMnPO_4 , LiFePO_4

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้นำไปใช้ในอุปกรณ์พกพาว่าร้อยละ 90 จะใช้วัสดุ LiCoO_2 ทำขั้วแคโทดเนื่องจากโคบอลต์เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อย ราคาสูงและไม่ปลอดภัย ทำให้วัสดุชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นขั้วแคโทดให้แบตเตอรี่สำหรับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือหรือกล้องถ่ายรูปเท่านั้น

สำหรับงานที่ต้องใช้ความปลอดภัยสูงนั้นและใช้วัสดุในปริมาณมากอย่างเช่น สำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้าหรือสำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้น จะใช้วัสดุประเภทสปีเนล LiMn_2O_4 เป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่า LiCoO_2 และมีความปลอดภัยสูงกว่า LiCoO_2 (เพราะใช้แมงกานีสเป็นธาตุหลักแทนโคบอลต์) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังมีเรื่องปัญหาเรื่องโครงสร้างที่ซับซ้อน มีกลไกการเปลี่ยนเฟสขณะใช้งานของวัสดุที่ซับซ้อน และไม่เสถียร เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง (เกินกว่า 50°C) วัสดุประเภทสุดท้ายคือวัสดุโอลิวิน LiFePO_4 ถึงแม้ว่าโอลิวิน LiFePO_4 จะมีความสามารถ

ในการเก็บพลังงานได้น้อยกว่าทั้งสปีเนลและเลเยอร์ออกไซด์เล็กน้อยก็ตาม แต่ถือเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในอนาคตสำหรับแบตเตอรี่ เพราะมีราคาถูก เนื่องจากธาตุหลักหาง่ายและราคาถูกกว่าโคบอลต์มาก อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความเสถียรมาก ที่อุณหภูมิสูง และมีความปลอดภัยสูง วัสดุโอลิวิน LiFePO_4 เหมาะสำหรับใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการความปลอดภัยสูง

วัสดุสำหรับทำขั้วแอโนด

โดยปกติแล้วความพร้อมใช้งาน (availability) ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด มักจะไม่ใช่อุปสรรคในการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเพราะความสามารถในการกักเก็บพลังงาน (energy density) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นขั้วแอโนดก็มีความสำคัญ งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการพยายามพัฒนาวัสดุที่สามารถประจุลิเทียมไอออนเข้าไปในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก โดยที่โครงสร้างไม่มีการขยายตัวมากเกินไปเพื่อที่จะสามารถลดปริมาณวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ลดต้นทุนการผลิตจากค่าวัสดุ รวมถึงทำให้แบตเตอรี่มีน้ำหนักเบา และมีขนาดเล็กลงด้วย

สำหรับวัสดุที่ใช้สำหรับทำขั้วแอโนดในปัจจุบันเกือบ 100 % เป็นวัสดุประเภทคาร์บอน เช่น แกรไฟต์ซึ่งเมื่อเราประจุไฟ (บังคับให้ลิเทียมไอออนไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด) ลิเทียมไอออนจะเข้าไปอัดตัวอยู่ในโครงสร้างของแกรไฟต์ในรูปของสารประกอบ Li_xC_6 ซึ่งมีความปลอดภัยสูงกว่าการใช้โลหะลิเทียมไปทำขั้วไฟฟ้าโดยตรงนอกจากวัสดุประเภทคาร์บอนแล้ววัสดุอื่น ๆ เช่น Li_xSi , Li_xGe , Li_xSn , Li_xSb เป็นต้น ก็นำมาใช้ทำขั้วแอโนดด้วย

เมื่อไม่นานมานี้วัสดุโครงสร้างจุลภาคพิเศษ หรือวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร เช่น ซิลิคอนนาโนไวร์ (Silicon nanowires) มีการค้นพบว่าเหมาะสำหรับนำมาทำขั้วแอโนด เพราะมีความสามารถในการรับลิเทียมไอออนมากกว่าแกรไฟต์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกว่า 10 เท่า แต่วัสดุเหล่านี้ยังประสบปัญหาเรื่องการขยายตัวอย่างมากเมื่อถูกอัดลิเทียมไอออนเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้วัสดุมีโอกาสที่จะเสื่อมสภาพและเสียหายได้ง่าย ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง เพราะวัสดุจะต้องทนต่อการหดและขยายของโครงสร้างทุกครั้งที่มีการใช้งานและการประจุไฟใหม่ การใช้วัสดุประเภทสารประกอบของลิเทียมโลหะออกไซด์ เช่น $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษคือไม่มีการหดหรือขยายตัวเลยเมื่อถูกอัดลิเทียมไอออนเข้าไปในโครงสร้าง (มีความเครียด (strain) เป็นศูนย์) ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ทำจากวัสดุนี้ยาวนานขึ้นมาก อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้มักมีความสามารถในการอัดลิเทียมไอออนได้น้อยเมื่อเทียบกับสารประกอบโลหะของลิเทียม จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของวัสดุที่ทำขั้วแอโนด ซึ่งหมายถึงการเพิ่มต้นทุนการผลิต และทำให้แบตเตอรี่มีขนาดและน้ำหนักที่มากขึ้นด้วย

วัสดุสำหรับทำอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบขึ้นจากสารละลายอินทรีย์ เช่น เอทิลคาร์บอเนต (Ethyl Carbonate, EC) โพรพิลีนคาร์บอเนต (Propylene Carbonate, PC) ไดเมทิลคาร์บอเนต (Dimethyl Carbonate, DMC) ไดเอทิลคาร์บอเนต (Diethyl Carbonate, DEC) 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (1,2-dimethoxyethane, DME) กับสารประกอบเกลือของลิเทียมเช่น LiPF_6 , LiClO_4 , LiBF_4 , LiAsF_6 , LiPF_3SO_3 และ $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$ เป็นต้น โดยที่สารแต่ละชนิดต่างมีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน เช่น LiClO_4 สามารถระเบิดได้ในสารละลายอินทรีย์บางชนิด LiBF_4 มีสภาพความนำไอออนต่ำและ LiAsF_6 มีสภาพความนำไอออนสูงแต่เป็นอันตรายมากเพราะมีสารหนู (arsenic) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญประกอบ เป็นต้น ปัจจุบันนี้วัสดุที่ถูกใช้มากที่สุดในการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนคือสารละลายอินทรีย์ EC DMC และ PC กับเกลือ LiPF_6

อิเล็กโทรไลต์ชนิดของแข็ง (solid electrolyte) เป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีความสนใจมาก ถึงแม้ว่าวัสดุประเภทนี้จะมีสภาพนำไฟฟ้าแบบไอออนต่ำกว่าวัสดุอิเล็กโทรไลต์ประเภทที่ใช้สารละลายอินทรีย์ก็ตามเพราะการที่ไม่ต้องใช้สารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นของเหลวที่ติดไฟง่ายมาเป็นส่วนประกอบในแบตเตอรี่จะทำให้แบตเตอรี่มีความปลอดภัยสูง และสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบโดยไม่ต้องกังวลกับของเหลวภายในอีกต่อไป ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้สำหรับทำอิเล็กโทรไลต์ชนิดของแข็ง ได้แก่ ลิเทียมเฮไลด์ (lithium halides) และลิเทียมบีตาอะลูมินา (lithium beta-alumina) เป็นต้น

วัสดุสำหรับทำแผ่นกั้นในแบตเตอรี่

โดยปกติแล้วแผ่นกั้นในแบตเตอรี่จะเป็นฟิล์มบางของโพลิเมอร์ เช่น โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene HDPE) โพลีเอทีเอ็นน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene UHMWDE) เพลิตเตตราฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) โพลีเอไมด์ (Polyamide, PA) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET), และไนลอน (nylon) เป็นต้น หรือเป็นฟิล์มบางชนิดคอมโพสิตของโพลิเมอร์-เซรามิกส์ ซึ่งมีการเติมอนุภาคนาโนของอะลูมินา Al_2O_3 ซิลิกา SiO_2 เซอร์โคเนีย ZrO_2 ไทเทเนีย TiO_2 แมกนีเซียมออกไซด์ MgO และแกมมา ลงไปในโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความร้อน ทำให้เปื่อยง่ายขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มบางโพลิเมอร์ได้แม้ว่าแผ่นกั้นในแบตเตอรี่จะไม่ได้เกี่ยวข้องใด ๆ กับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในแบตเตอรี่แต่ก็เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญอย่างที่กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่าแผ่นกั้นในแบตเตอรี่เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนดทำให้เกิดการลัดวงจร ดังนั้นการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแผ่นกั้นในแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะกับงานที่ต้องการความปลอดภัยสูงอย่างเช่น ในรถยนต์ไฟฟ้า

แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ยังทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ลิเทียมไฮดรอกไซด์และอิเล็กตรอนไหลได้ง่าย แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ที่ดีต้องบางแต่แข็งแรง ทนทานต่อความร้อน มีความพรุนตัวสูงและมีสภาพเปียกได้สูง (wettability)

วัสดุสำหรับทำตัวรับกระแส

ตัวรับกระแสเป็นอีกส่วนประกอบหนึ่งของแบตเตอรี่ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องใด ๆ กับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในแบตเตอรี่ เพียงทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนไหลผ่านและสามารถนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ได้เท่านั้นในทางทฤษฎีแล้วเราอาจคิดว่าสามารถนำวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าที่ดีใด ๆ ก็ได้ (อย่างเช่นโลหะทุกชนิด) มาใช้ทำตัวรับกระแสแต่ในความเป็นจริงมีเพียงวัสดุบางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทำตัวรับกระแสเพราะวัสดุที่ใช้งานได้จะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่วงความต่างศักย์ที่เหมาะสมเช่น โลหะ Al , Cu , Ti , Pt , Ni และ Be เป็นต้น โดยที่โลหะอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้สำหรับเป็นตัวรับกระแสของขั้วแคโทดมากที่สุดและทองแดงเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นตัวรับกระแสของขั้วแอโนดมากที่สุด

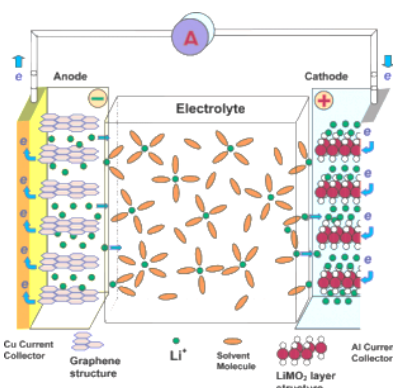
นอกจากนี้ยังเชื่อว่าการนำโลหะผสมหลายชนิดเช่น $Ni-P$, $Pt-Rh$, Ti -based alloys, Cu -based alloys, Co -based alloys และเหล็กกล้าไร้สนิม มาใช้ทำตัวรับกระแสด้วยแต่ไม่มากนักเพราะโลหะผสมเหล่านี้มักมีราคาสูงกว่าทองแดงและอะลูมิเนียม เนื่องจากตัวรับกระแส

เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (เพราะต้องใช้ในปริมาณที่มากและวัสดุมีน้ำหนักค่อนข้างมากส่งผลต่อการเปลี่ยน Wh/L และ Wh/kg ของแบตเตอรี่ได้) ดังนั้นตัวรับกระแสที่ดี นอกจากจะต้องมีความนำไฟฟ้าสูง มีความบริสุทธิ์สูง มีความเสถียรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และราคาถูกลงแล้ว ควรจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถทำให้บางได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเหมาะสมและยอมให้วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าที่จะใช้ฉาบเกาะติดง่าย

หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีดังนี้ ขณะที่ประจุไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่เราประจุไฟเข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ซึ่งจะทำให้ลิเทียมไอออนไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด (ขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ผ่านอิเล็กโทรไลต์ แฝงกันแบตเตอรี่และเข้าไปสอดตัว (intercalate) อยู่ในโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด (ขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนก็ต้องไหลจากขั้วแคโทดไปสู่ขั้วแอโนดเพื่อให้เกิดความสมดุลของประจุ (charge balance) โดยผ่านทางวงจรไฟฟ้าภายนอกด้วย ผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด เช่น $LiMO_2$, LiM_2O_4 , $LiMPO_4$ (โดยที่ M แทน Fe , Co , Mn , หรือ Ni) และวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด เช่น คาร์บอนอยู่ในสภาวะไม่เสถียร

ขณะที่ใช้งานปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่สามารถเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous reaction) โดยลิเทียมไอออนที่เราบังคับให้ไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดและไปแทรกตัวอยู่ที่ขั้วแอโนดนั้นจะไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนดและกลับเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดตามเดิม ทำให้ระบบมีสภาพเสถียรอีกครั้งพร้อมกับให้อิเล็กตรอนผ่านวงจรไฟฟ้า และให้พลังงานไฟฟ้าออกมา เมื่อใดก็ตามที่ลิเทียมไอออนไหลกลับไปเต็มหมดปฏิกิริยาก็จะสิ้นสุด (ถ่านหมด) หากต้องการนำแบตเตอรี่ไปใช้ใหม่อีกต้องประจุไฟอีกครั้ง และเกิดเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องไปจนกว่าแบตเตอรี่จะหมดอายุการใช้งาน

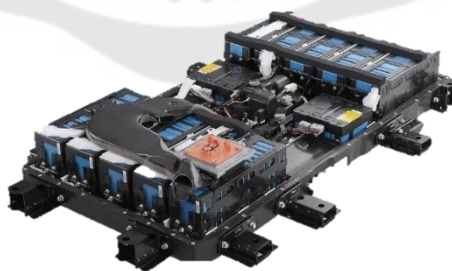


ภาพประกอบ 18 ภาพแสดงหลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ที่มา: <https://chidseylab.stanford.edu/anode-passivation-lithium-ion>

แนวโน้มการพัฒนาและวิจัยลิเทียมไอออนแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ในการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า หรือ (EV) นั้น แหล่งจ่ายพลังงานต้องมีคุณสมบัติที่เกื้อหนุนการขับเคลื่อน หลักๆเช่น เก็บพลังงานได้เยอะ (High Energy Density) เพื่อที่จะได้ระยะทางเยอะ และจ่ายพลังงานได้รวดเร็ว (High Power Density) เพื่อที่จะเร่งรถได้เร็ว และคุณสมบัติที่รองลงมาเช่น ชาร์จได้เร็ว (Fast Charging), มีอายุการใช้งานนาน (Long Lifetime), ราคาถูก (Low Price) และมีการซ่อมบำรุงต่ำ (Low Maintenance) ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่เราอยากได้ ซึ่ง แบตเตอรี่ (Battery) ก็เป็น Energy Source ชนิดหนึ่ง ที่สามารถตอบโจทย์ของความต้องการเหล่านี้ได้อย่างดี และถูกใช้ในวงการรถ EV มาเป็นเวลานาน ณ ปัจจุบันนี้



ภาพประกอบ 19 ภาพแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ที่มา: <https://motortrivia.com>

บทที่ 3

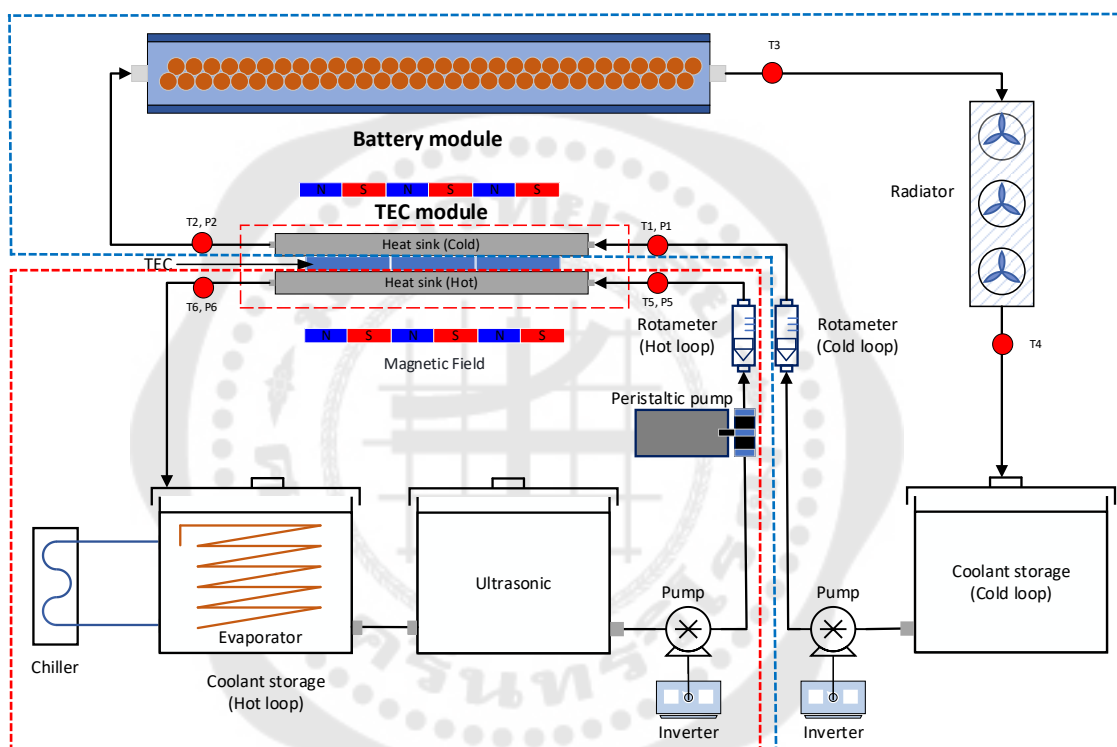
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ทดลอง

ในการออกแบบระบบระบายความร้อนโดยการประยุกต์ใช้ด้านร้อน-เย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับติดตั้งกับชุดแบตเตอรี่ โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นจังหวะและแบบราบเรียบอาศัยสารตัวนำต่างชนิดกัน คือ น้ำและนาโนฟลูอิดร่วมกับสนามแม่เหล็ก ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ประกอบกัน

1. เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric) ทำหน้าที่ให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบ
2. ปั๊มน้ำ (Pump) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันน้ำเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ ขนาดของปั๊มจะหาได้จากการคำนวณ
3. หม้อน้ำ (Radiator) ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากของเหลวที่ได้จากการถ่ายเทความร้อน จากเทอร์โมอิเล็กทริกส์
4. ถังเก็บของเหลว (Cold water tank) ทำหน้าที่บรรจุของเหลวเพื่อให้ของเหลวเข้าสู่ระบบ
5. วาล์ว (Value) ทำหน้าที่ เปิด-ปิด และหรืออัตราการไหลของของไหล
6. แหล่งจ่ายไฟ (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์
7. อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter) ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์
8. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger) ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลต่าง ๆ ของระบบ
9. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) ทำหน้าที่ส่งคลื่นอัลตราโซนิกครบถ้วนให้ของไหลนาโนไม่ตกตะกอน
10. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของของไหล
11. ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) ทำหน้าที่รีดสายยางให้เกิดจังหวะการไหลของของไหล
12. แผงระบายความร้อน (Heat sink) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิขณะทำงานของอุปกรณ์
13. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple T Type) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของของไหลในระบบ

14. อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (Pressure Sensor) ทำหน้าที่วัดความดันของของไหลในระบบ
15. ชุดแบตเตอรี่แพ็ค (Module Battery Pack) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการระบายความร้อน
16. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ทำหน้าที่รบกวนการไหลของอนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์



ภาพประกอบ 20 ไดอะแกรมและอุปกรณ์การทดลองโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์

จากภาพประกอบ 20 ทางด้านร้อนของไหลจะไหลออกจากถัง Ultrasonic ผ่านปั๊มเข้าไปยัง Peristaltic pump แล้วเข้าไปสู่ตัววัดอัตราการไหลหรือ Rotameter เพื่อควบคุมอัตราการไหล จากนั้นจะผ่านตัววัดอุณหภูมิที่ T5, และตัววัดแรงดันตกคร่อม P5 เพื่อวัดอุณหภูมิขาเข้าฮีตซิงค์ จากนั้นจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในฮีตซิงค์ และไหลออกมาที่ตัววัดอุณหภูมิที่ T6, และตัววัดแรงดันตกคร่อม P6 เพื่อวัดอุณหภูมิขาออกจากฮีตซิงค์ และระบายความร้อนออกจากของไหลที่ Evaporator ส่วนทางด้านฝั่งเย็นน้ำจะไหลออกจาก Coolant storage ผ่านปั๊มเข้าไปสู่ตัววัดอัตราการไหลหรือ Rotameter จากนั้นจะผ่านตัววัดอุณหภูมิที่ T1, และตัววัดแรงดันตกคร่อม

P1 เพื่อวัดอุณหภูมิขาเข้าฮีทซิงค์จากนั้นจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในฮีทซิงค์ และไหลออกมาที่ตัววัดอุณหภูมิที่ T6, และตัววัดแรงดันตกคร่อม P6 เพื่อวัดอุณหภูมิขาออกจากฮีทซิงค์ และระบายความร้อนออกจากของไหลที่ Radiator



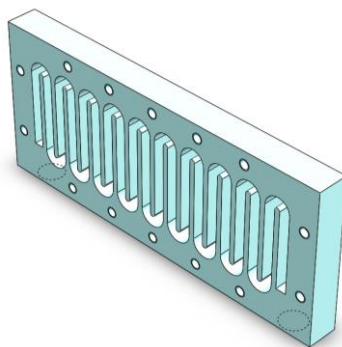
ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งบนแม่เหล็ก

จากภาพประกอบ 21 เป็นการแสดงในส่วนของชุดระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ติดตั้งเข้ากับสนามแม่เหล็ก โดยระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กและฮีทซิงค์จะวัดจากผนังด้านนอกสุดของฮีทซิงค์มายังผนังด้านในสุดของแผ่นสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กจะสามารถปรับเลื่อนได้ตามระยะที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบ 22 เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric)



ภาพประกอบ 23 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat sink)



ภาพประกอบ 24 แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)



ภาพประกอบ 25 ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump)



ภาพประกอบ 26 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)



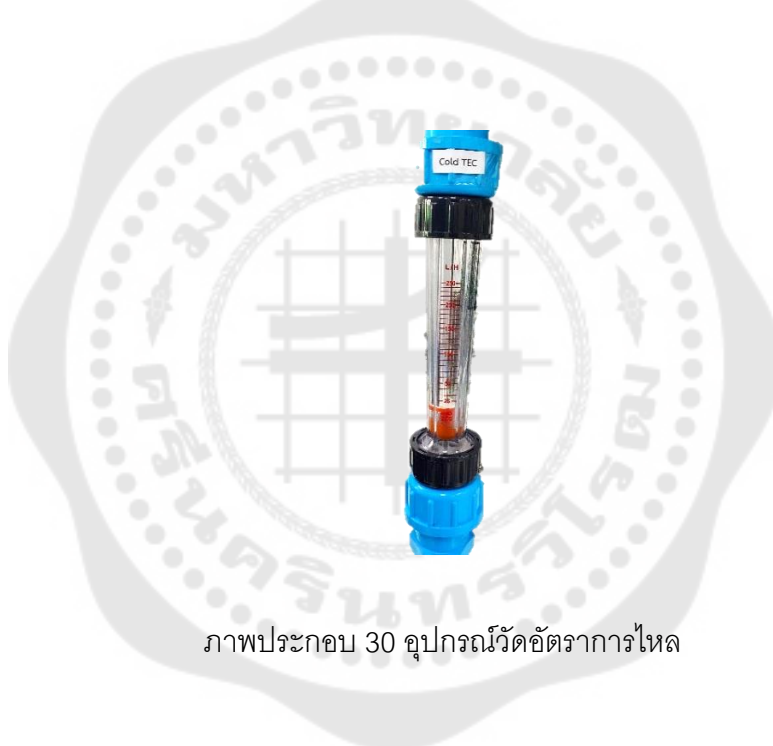
ภาพประกอบ 27 ซิลเลอร์ทำความเย็น (Chiller)



ภาพประกอบ 28 หม้อน้ำ (Radiator)



ภาพประกอบ 29 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger)



ภาพประกอบ 30 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

วิธีการทดลอง

ทำการเก็บข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ประกอบชุดไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ต้องการทดสอบ
2. เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองให้พร้อมใช้งาน
3. ทำการเติมของไหลหล่อเย็นลงในเครื่องอัลตราโซนิก
4. เปิดชุดแบตเตอรี่เพื่อให้ทำงานโดยปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส
5. เปิดปั้มน้ำให้ทำงานและปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 30 L/h
6. เมื่ออุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นคงที่ หลังจากนั้นจึงเปิดชุดไมโครเทอร์โมอิเล็ก

ทริกส์ที่แรงดันไฟฟ้า 8 โวลต์

7. ทำการบันทึกข้อมูลการทดลอง
8. ปรับอัตราการไหลของน้ำ 40 และ 50 m³/h ตามลำดับ
9. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์ 10 และ 12 โวลต์ ตามลำดับ
10. ดำเนินตามข้อ 1-8 โดยเพิ่มการไหลเป็นจังหวะโดยการติดตั้งปั้มรีดสายยางที่ 10 และ 20 Hz
11. ดำเนินการตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนของไหลหล่อเย็นเป็นของไหลนาโนเฟอโร ในสัดส่วน 0.005 และ 0.015 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร
12. ดำเนินตามข้อ 1-10 โดยทำการขยับสแนมแม่เหล็กให้มีระยะห่างจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตรตามลำดับ

ตาราง 2 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ

เครื่องมือ	ความแม่นยำ	ความคลาดเคลื่อน
อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า	0.2	± 0.5
อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	0.1	± 0.2
อุปกรณ์วัดความดัน	0.02	± 0.2
อุปกรณ์บันทึกข้อมูล	0.1	± 0.1

ตัวแปรที่ได้จากการทดลอง

1. อุณหภูมิของของไหลขาเข้าเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้านเย็น	T_1
2. อุณหภูมิของของไหลขาออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้านเย็น	T_2
3. อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นจากชุดแบตเตอรี่ไปยังหม้อน้ำ	T_3
4. อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นจากหม้อน้ำไปยังถังน้ำ	T_4
5. อุณหภูมิของของไหลขาเข้าเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้านร้อน	T_5
6. อุณหภูมิของของไหลขาออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้านร้อน	T_6
7. อุณหภูมิแบตเตอรี่	$T_{Battery}$
8. อุณหภูมิผนังด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	$T_{TEC_{Hot}}$
9. อุณหภูมิผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์	$T_{TEC_{Cold}}$

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนในชุดเครื่องระบายความร้อน อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$)

$$\dot{m} = \rho Q_w \quad (3-1)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 Q_w คือ อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q_{total})

$$Q_{total} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (3-2)$$

โดยที่ Q_{total} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (W)
 $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J/kg \cdot K$)
 ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)

$$Re = \frac{\rho Q_w D_e}{\mu A_i} \quad (3-3)$$

โดยที่ Re คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

Q_w คือ อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)

D_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

μ คือ ความหนืดพลวัต ($N \cdot s/m^2$)

A_i คือ พื้นที่ผิวของทางเข้า (m^2)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h)

$$h = \frac{Q_{total}}{A_{total}(T_b - T_i)} \quad (3-4)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m \cdot K$)

Q_{total} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (W)

A_{total} คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (m^2)

T_b คือ อุณหภูมิที่ฐานครีป ($^{\circ}C$)

T_i คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า ($^{\circ}C$)

นัสเซลน์มเบอร์ (Nu)

$$Nu = \frac{h D_e}{k_w} \quad (3-5)$$

โดยที่ Nu คือ นัสเซลน์มเบอร์

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m \cdot K$)

D_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ ($W/m \cdot K$)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)

$$COP = \frac{Q}{P} \quad (3-6)$$

โดยที่ COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

P คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (W)

ความต้านทานความร้อน (R_t)

$$R_t = \frac{T_b - T_i}{Q_{total}} \quad (3-6)$$

โดยที่ R_t คือ ความต้านทานความร้อน ($^{\circ}C/W$)

T_b คือ อุณหภูมิที่ฐานครีป ($^{\circ}C$)

T_i คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า ($^{\circ}C$)

Q_{total} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (W)

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง โดยการวิเคราะห์ผลจะพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ และการไหลของของไหลหล่อเย็น ได้แก่ ชนิดของของไหลหล่อเย็น 2 ชนิด คือ น้ำ และของไหลเพอร์โร กรณีใช้ของไหลเพอร์โรจะกำหนดให้มีความเข้มข้นของอนุภาคต่อน้ำที่ 0.005 % และ 0.015 % โดยปริมาตร ระยะระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับชุดครีบบระบายความร้อนที่ 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร อัตราการไหลของของไหลหล่อเย็นที่ 30, 40, และ 50 L/hr และการไหลของของไหลหล่อเย็นแบบต่อเนื่องและไหลเป็นจังหวะ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปออกเป็นกลุ่มดังนี้

- คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณี ชนิดของของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนแตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ น้ำ และของไหลเพอร์โร

- คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณี ของไหลเพอร์โรที่มีและไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก โดยของไหลเพอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กและโมดูลทำความเย็นที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร

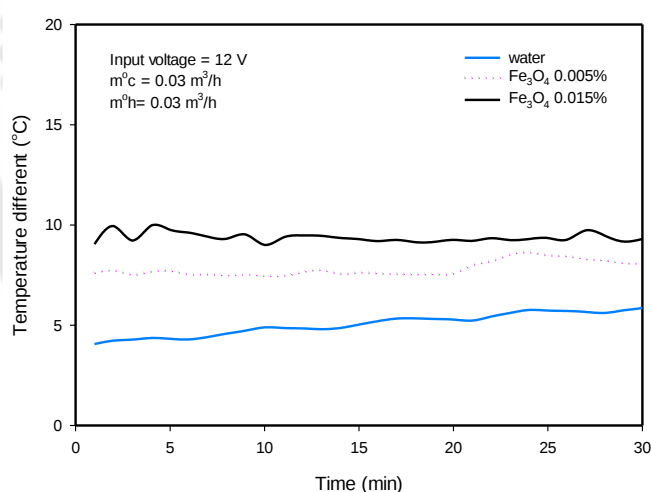
- คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณี ของไหลเพอร์โรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร

- คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณี ของไหลเพอร์โรที่การไหลแบบราบเรียบและไหลแบบเป็นจังหวะภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร

4.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีชนิดของของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนแตกต่างกัน

4.1.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก ($T_6 - T_5$) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ กรณีความเข้มข้นของของไหลนาโนแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ($T_6 - T_5$) ที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่แปรผันตามเวลา ทดสอบโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 12 โวลต์ อัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 0.03 m³/h และอัตราการไหลด้านร้อนเท่ากับ 0.03 m³/h โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอโรโร ที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า ของไหลเฟอโรโร ความเข้มข้น 0.015 % มีค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_6 - T_5$) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์สูงที่สุดตลอดการทดลองหรืออยู่ที่ประมาณ 10 °C ที่ของไหลเฟอโรโรความเข้มข้นเท่ากับ 0.005 % มีค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ($T_6 - T_5$) เท่ากับ 8 °C และน้ำมีค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ($T_6 - T_5$) เท่ากับ 3 °C ตามลำดับ



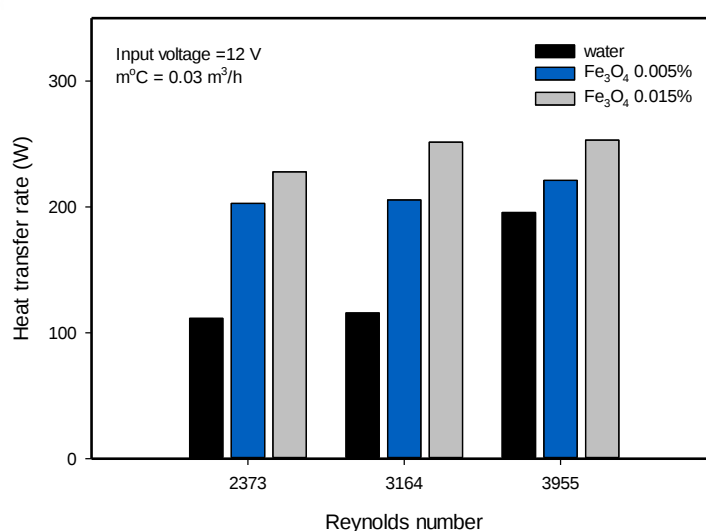
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้ากับทางออก ($T_6 - T_5$) กับเวลาโดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกด้านร้อน ($T_6 - T_5$) ที่ของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 % นั้นมีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 2 °C และ 7 °C หรือคิดเป็น 20 % และ 70 % ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดครี

ระบายความร้อนที่ใช้ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีประสิทธิภาพมากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำ ตามลำดับ

4.1.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

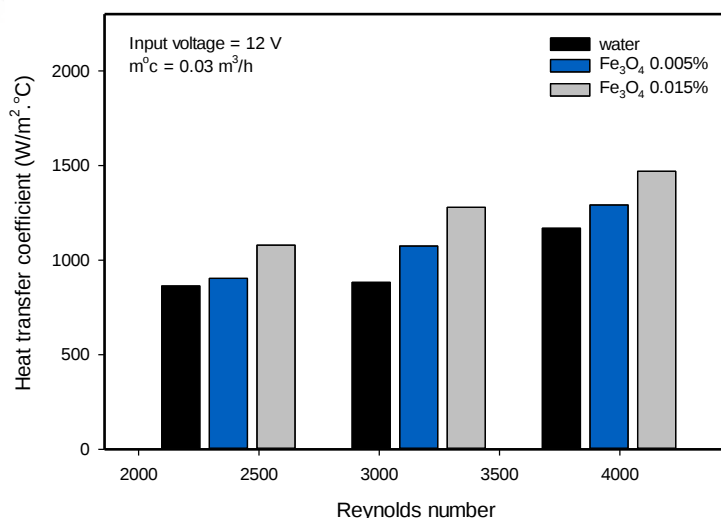
ภาพประกอบ 32 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.03 \text{ m}^3/\text{h}$ โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % จะพบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดตลอดการทดลอง และของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำ มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 25.09 W และ 116.47 W หรือคิดเป็น 11 % และ 51.09 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 45.94 W และ 135.82 W หรือคิดเป็น 18.25 % และ 53.98 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 31.93 W และ 57.14 W หรือคิดเป็น 12.61 % และ 22.57 % ตามลำดับ



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน

4.1.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

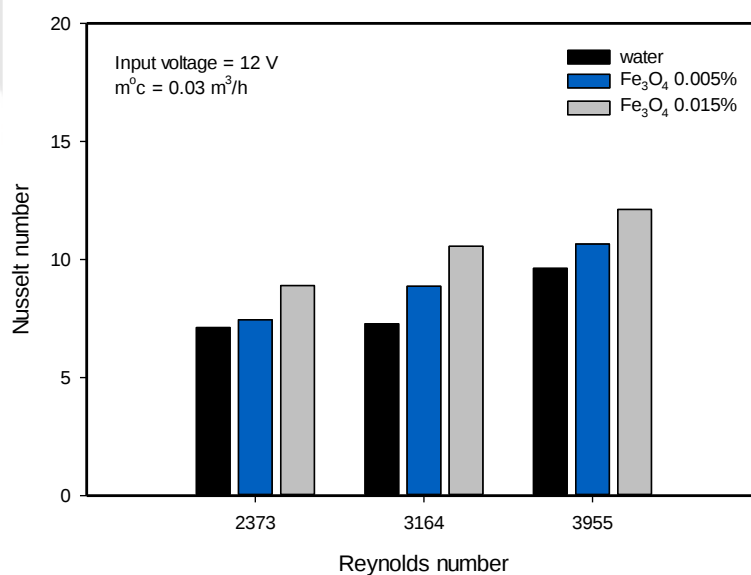
ภาพประกอบ 33 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.03 \text{ m}^3/\text{h}$ โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % จากผลการทดลองพบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงตลอดการทดลอง และของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ $177 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และ $219 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 16.24 % และ 20 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ $208 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และ $403 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 16 % และ 31 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ $180 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และ $306 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 12 % และ 20.54 % ตามลำดับ



ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน

4.1.4 ตัวเลขนัสเซล (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

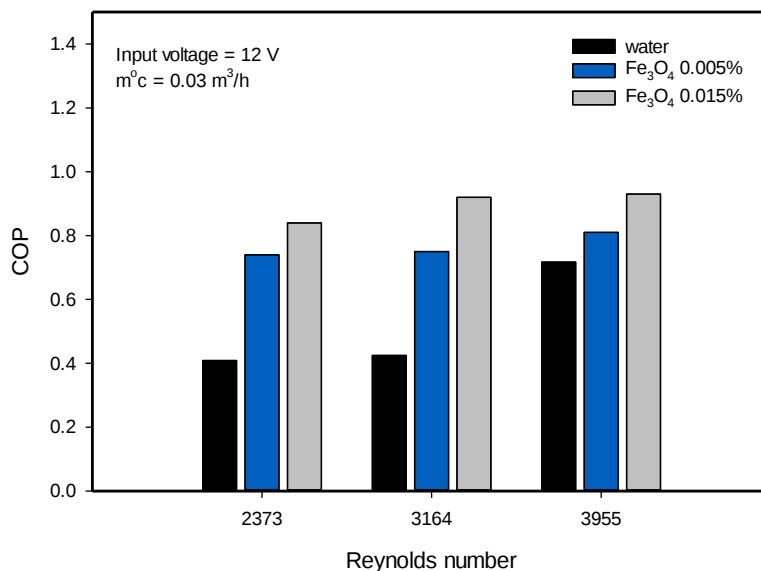
ภาพประกอบ 34 แสดงถึงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.03 \text{ m}^3/\text{h}$ โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์ไรต์ที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015% พบว่าของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.015 % มีค่านัสเซลนัมเบอร์สูงตลอดการทดลอง และของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.005 % และน้ำ มีค่านัสเซลนัมเบอร์ลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 1.45 และ 1.78 หรือคิดเป็น 16.29 % และ 20 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,164 ค่านัสเซลนัมเบอร์ของของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 1.69 และ 3.28 หรือคิดเป็น 16 % และ 31.06 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,955 ค่านัสเซลนัมเบอร์ของของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรต์ความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 1.46 และ 2.49 หรือคิดเป็น 12.04 % และ 20.54 % ตามลำดับ



ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์ กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นที่ด้านร้อนต่างกัน

4.1.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 35 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เท่ากับ $0.03 \text{ m}^3/\text{h}$ โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงตลอดการทดลอง และของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลงมาตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 0.1 และ 0.43 หรือคิดเป็น 11.09 % และ 51.19 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 0.17 และ 0.49 หรือคิดเป็น 18.47 % และ 53.26 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และน้ำอยู่ที่ 0.12 และ 0.21 หรือคิดเป็น 12.90 % และ 22.79 % ตามลำดับ



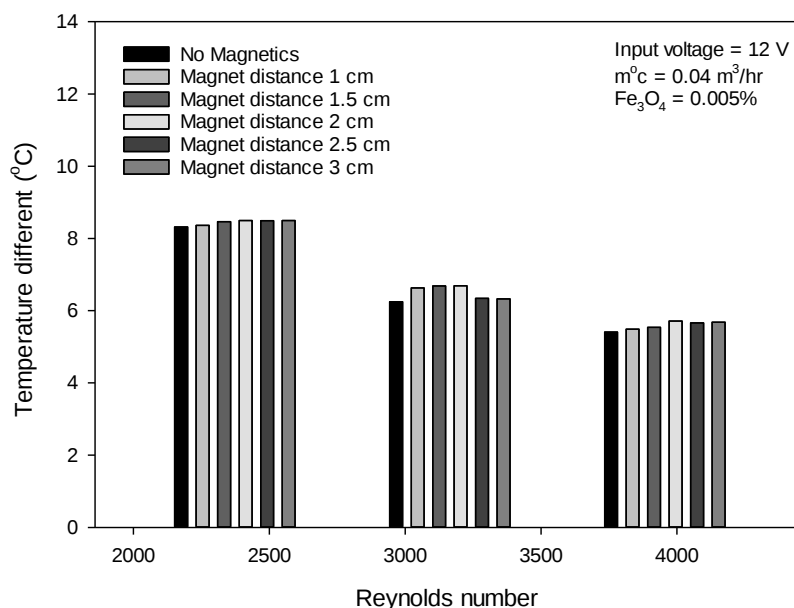
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นด้านร้อนต่างกัน

จากผลสรุปที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ของไหลหล่อเย็นที่มีส่วนผสมของอนุภาคเฟอโรโรที่ขนาดของอัตราส่วนที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าน้ำที่ 20 % และ 70 % ที่ความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % โดยปริมาตร ตามลำดับ จากผลสรุปดังกล่าวนี้ สามารถอนุมานได้ว่าของไหลที่ผสมอนุภาคเฟอโรโรซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนที่สูงกว่าน้ำ จะรบกวนกระแสการไหลของของไหลหล่อเย็นเนื่องจากมีน้ำหนักที่มากกว่าแต่จะเกิดการเคลื่อนตัวเมื่อได้รับอิทธิพลของของไหลขณะที่เคลื่อนตัวไปกับการไหลของของไหลด้วยแรงขับจากปั๊ม ซึ่งส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลเฟอโรโรกับผนังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรใช้น้ำเป็นของไหลหล่อเย็น ในการทดลองนี้จะใช้ชุดครีบบระบายความร้อนที่ทำมาจากอลูมิเนียมซึ่งมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อน จากสมมติฐานข้างต้น ของไหลเฟอโรโรสามารถพาความร้อนที่ผนังชุดครีบบระบายความร้อนได้ดีกว่าน้ำ และให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองดังที่ได้อธิบายดังภาพประกอบ 30 – 34 แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอนุภาคเฟอโรโรกับน้ำไม่ส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะสังเกตได้จากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ความเข้มข้น 0.005 % มีค่าสูงกว่า 0.015 % เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ของไหลมีความหนืดสูงขึ้น น้ำหนักเพิ่มขึ้น ของไหลไม่สามารถไหลได้อย่างอิสระ ดังนั้นของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005 % จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์ต่อไปเพื่อศึกษาตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการทดลองต่อไป

4.2 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอโรโรที่มีและไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก โดยของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กและโมดูลทำความเย็นที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร

4.2.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอโรโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดลดการทดลอง และที่ระยะอื่นๆ มีผลต่างของอุณหภูมิลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 2,730 ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.014 , 0.03 , 0.01 , 0.001 และ 0.18°C หรือคิดเป็น 1.6 %, 0.35 %, 0.07 %, 0.012 % และ 2.02 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,164 ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.06 , 0.01 , 0.35 , 0.36 และ 0.42°C หรือคิดเป็น 0.91 %, 0.08 %, 5.20 %, 5.43 % และ 6.31 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,955 ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.23 , 0.17 , 0.05 , 0.03 และ 0.31°C หรือคิดเป็น 3.92 %, 3.05 %, 0.91 %, 0.58 % และ 5.34 % ตามลำดับ

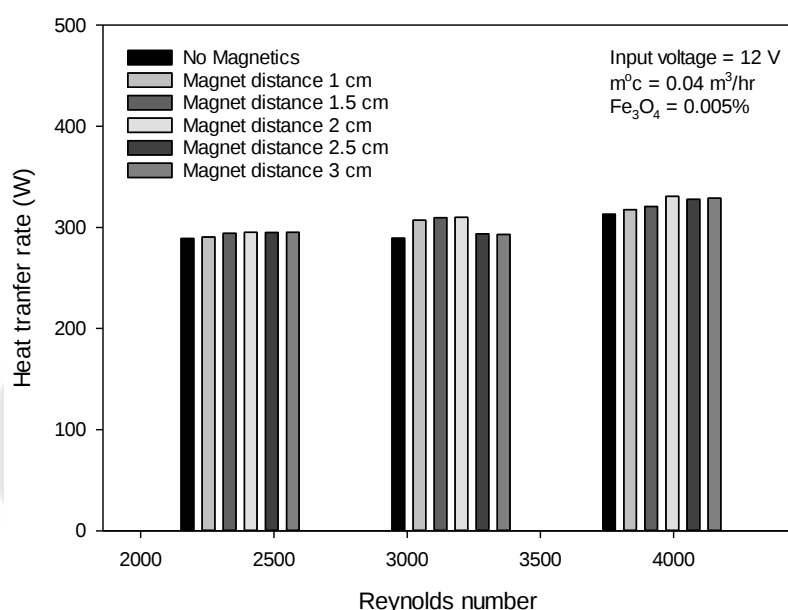


ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์ไร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

4.2.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์ไร 0.005 % ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงตลอดการทดลอง และที่ระยะอื่นๆ มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 4.72, 1.01, 0.04, 0.2 และ 6.17 W หรือคิดเป็น 1.6 %, 0.34 %, 0.02 %, 0.07 % และ 2.09 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 2.81, 0.24, 16.12, 16.84 และ 20.89 W หรือ

คิดเป็น 0.91 %, 0.08 %, 5.20 %, 5.43 % และ 6.74 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 13.10, 10.09, 3.00, 1.92 และ 17.63 W หรือคิดเป็น 3.96 %, 3.05 %, 0.91 %, 0.36 % และ 5.33 % ตามลำดับ

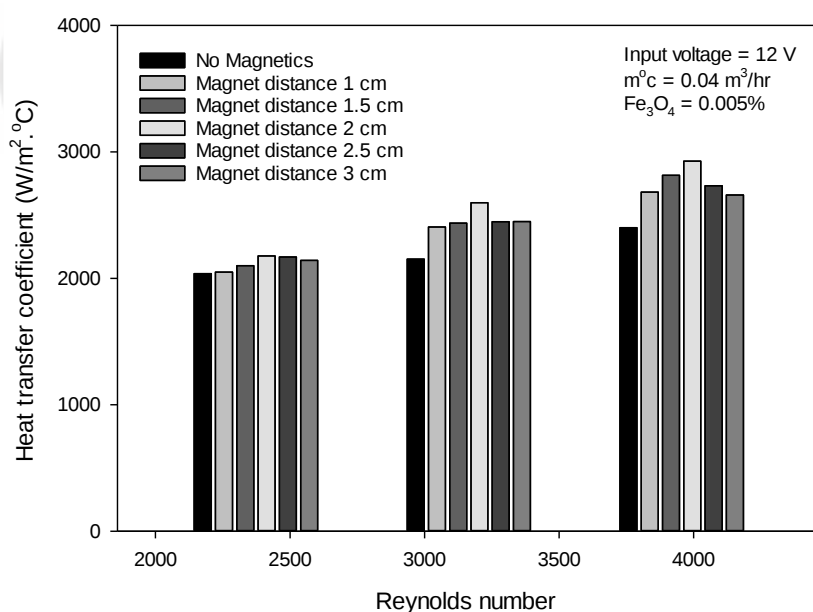


ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

4.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกันที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าระยะอื่นๆ ตลอดการทดลอง และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

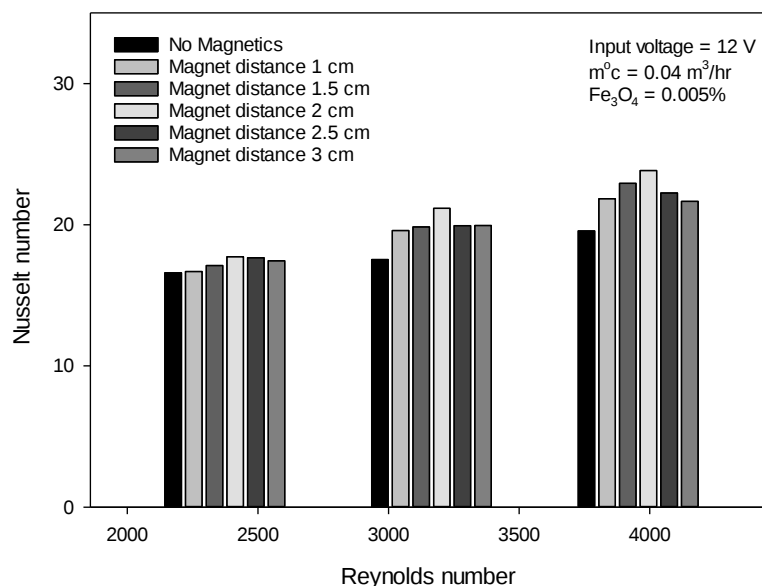
ของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 127.42, 76.02, 7.36, 34.28 และ 139.48 $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 5.58 %, 3.49 %, 0.33 %, 1.57 % และ 6.41 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 192.14, 161.71, 148.99, 149.95 และ 445.37 $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 7.40 %, 6.22 %, 5.74 %, 5.77 % และ 17.14 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 245.07, 111.87, 194.58, 267.92 และ 525.55 $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 8.37 %, 3.82 %, 6.65 %, 9.15 % และ 17.96 % ตามลำดับ



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

4.2.4 นัสเซลน์มเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลน์มเบอร์กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอโร 0.005 % ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่านัสเซลน์มเบอร์สูงสุดการทดลอง และที่ระยะอื่นๆ มีค่านัสเซลน์มเบอร์ลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 2,730 ค่านัสเซลน์มเบอร์ของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 1.04, 0.62, 0.06, 0.28 และ 1.14 หรือคิดเป็น 5.85 %, 3.49 %, 0.34 %, 1.56 % และ 6.41 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 3,164 ค่านัสเซลน์มเบอร์ของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 1.56, 1.32, 1.21, 1.22 และ 3.63 หรือคิดเป็น 7.40 %, 6.22 %, 5.73 %, 5.77 % และ 17.14 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 3,955 ค่านัสเซลน์มเบอร์ของของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 2.00, 0.91, 1.59, 2.18 และ 4.28 หรือคิดเป็น 8.37 %, 3.82 %, 6.65 %, 9.15 % และ 17.96 % ตามลำดับ

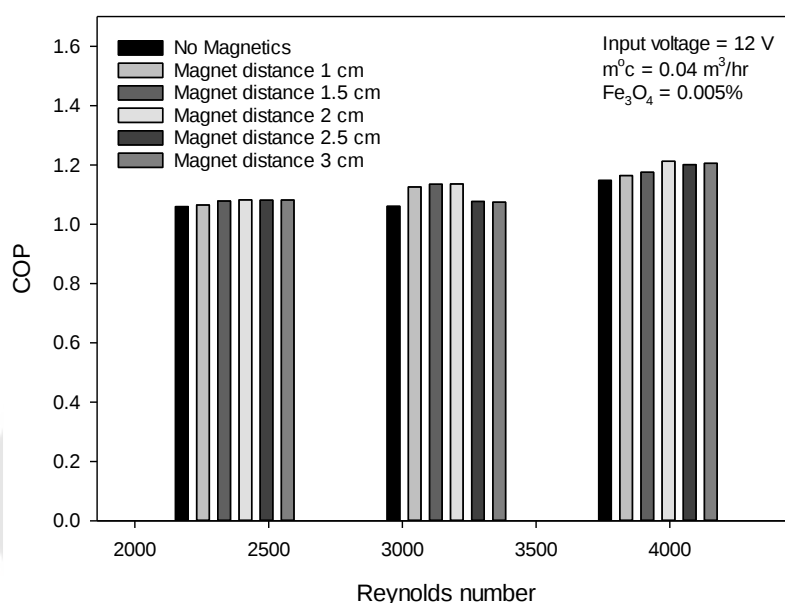


ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์ไร 0.005% ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

4.2.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์ไร 0.005 % ไหลผ่านความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงตลอดการทดลอง และที่ระยะอื่นๆ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.02, 0.004, 0.0001, 0.0007 และ 0.023 หรือคิดเป็น 1.60 %, 0.35 %, 0.01 %, 0.07 % และ 2.08 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.01, 0.001, 0.06, 0.062 และ 0.08 หรือคิดเป็น 0.91 %, 0.08 %, 5.20 %, 5.43 % และ 6.65 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของ

ของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.048, 0.04, 0.011, 0.007 และ 0.065 หรือคิดเป็น 3.97 %, 3.05 %, 0.91 %, 0.59 % และ 5.34 % ตามลำดับ

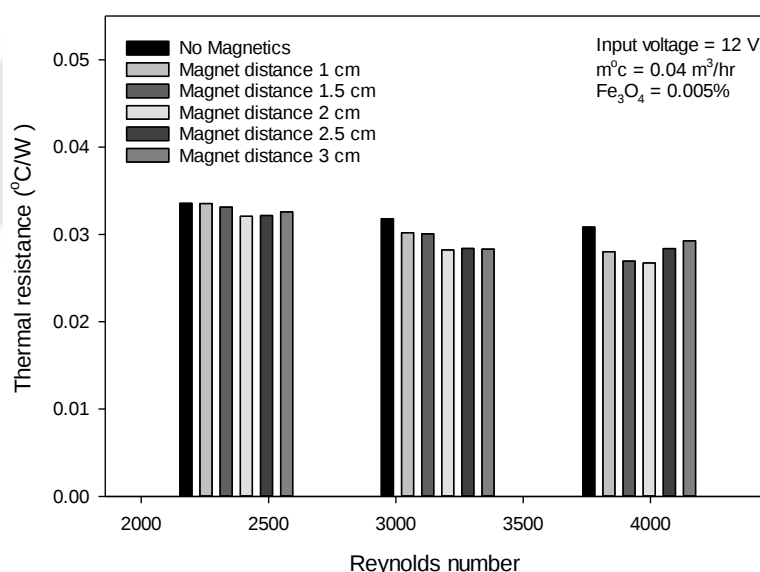


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์โร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

4.2.6 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลเฟอร์โร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบระยะของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร พบว่าเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำตลอดการทดลอง และที่ระยะอื่นๆ มีค่าความต้านทานความร้อนรวมสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็ก ระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.004, 0.001, 0.0001,

0.0005 และ 0.0015 หรือคิดเป็น 4.18 %, 3.02 %, 0.31 %, 1.53 % และ 4.46 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็ก ระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก โดยประมาณที่ 0.002, 0.0019, 0.0001, 0.0002 และ 0.004 °C/W หรือคิดเป็น 6.62 %, 6.31 %, 0.35 %, 0.71 % และ 11.32 % ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็ก ระยะ 1, 1.5, 2.5, 3 เซนติเมตร และไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่ที่ 0.001, 0.0003, 0.01, 0.003 และ 0.004 °C/W หรือคิดเป็น 4.64 %, 1.11 %, 5.99 %, 8.87 % และ 13.59 % ตามลำดับ



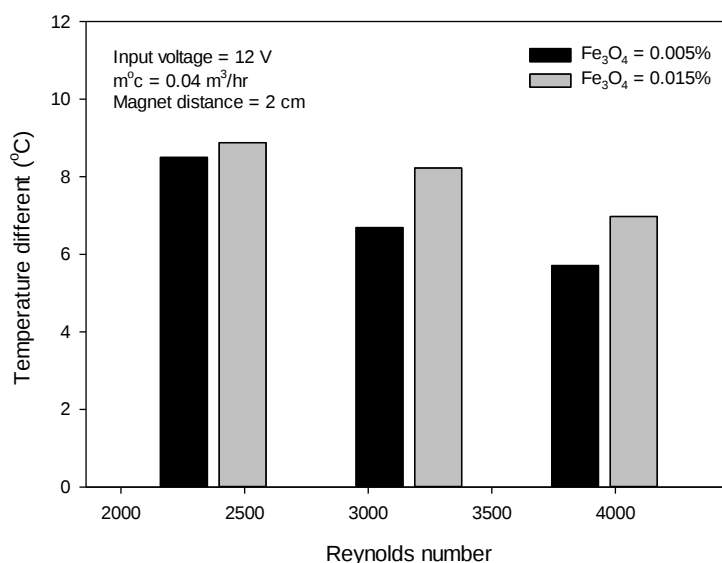
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อน กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์โดยใช้ของไหลเฟอโรโร 0.005% ไหลผ่านความเข้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็กต่างกัน

ในการศึกษาส่วนนี้ จะศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชุดครีระบายความร้อนที่รับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากอนุภาคเฟอร์ไรต์คุณสมบัติเป็นโลหะและทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการทดสอบกับสนามแม่เหล็กจึงเป็นมีความน่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยังไม่มีทดลองใดที่ศึกษา ระยะห่างที่เหมาะสมกับชุดทดลองที่มีการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกกับชุดครีระบายความร้อน ดังนั้น การทดลองนี้จึงได้ออกแบบการทดลองโดยกำหนดระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กกับชุดครีระบายความร้อนที่ระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, และ 3 เซนติเมตร เพื่อกำหนดระยะที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ชุดครีระบายความร้อนถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชุดครีระบายความร้อน โดยที่ระยะห่างที่ 1 เซนติเมตร และ 1.5 เซนติเมตร จะเป็นระยะที่อิทธิพลของสนามแม่เหล็กทำปฏิกิริยากับอนุภาคเฟอร์ไรต์ในของไหลมาก ทำให้อนุภาคเฟอร์ไรต์เกิดการเกาะตัวที่บริเวณสนามแม่เหล็ก ดังนั้น จึงทำให้เกิดการต้านการไหลของของไหล นอกจากนี้ยังส่งผลให้สัดส่วนของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อพิจารณาที่ระยะห่าง 2.5 เซนติเมตร และ 3 เซนติเมตร อิทธิพลของสนามแม่เหล็กทำปฏิกิริยากับอนุภาคเฟอร์ไรต์ในปริมาณที่น้อยและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนตัวของอนุภาคเฟอร์ไรต์ซึ่งสามารถสังเกตได้จากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ระยะดังกล่าวนี้จะสูงกว่าน้ำเล็กน้อย แต่จะต่ำกว่าที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร ที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เนื่องจากสนามแม่เหล็กไปรบกวนอนุภาคเฟอร์ไรต์ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวแบบอิสระและไร้รูปแบบ ซึ่งการเคลื่อนตัวดังกล่าวนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้

4.3 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร

4.3.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

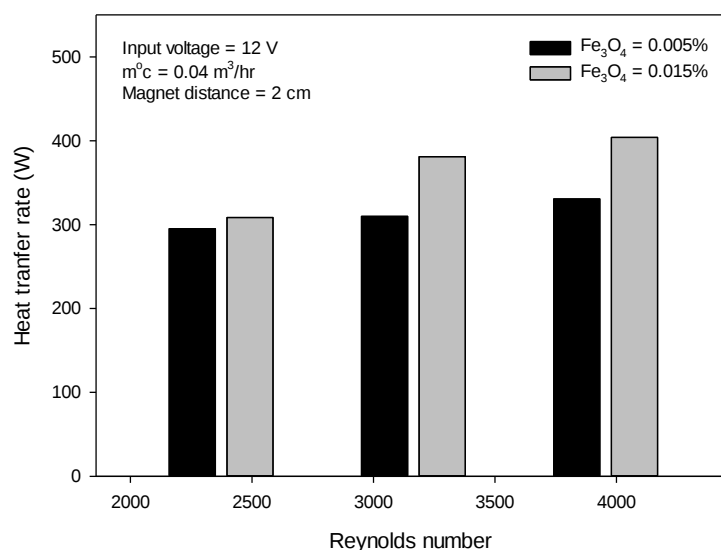
ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าผลต่างของอุณหภูมิตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % มีค่าผลต่างของอุณหภูมิลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 0.38 องศาเซลเซียส หรือคิดเป็น 4.3 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 1.5°C หรือคิดเป็น 18.64 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 1.26°C หรือคิดเป็น 18.11 %



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร

4.3.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

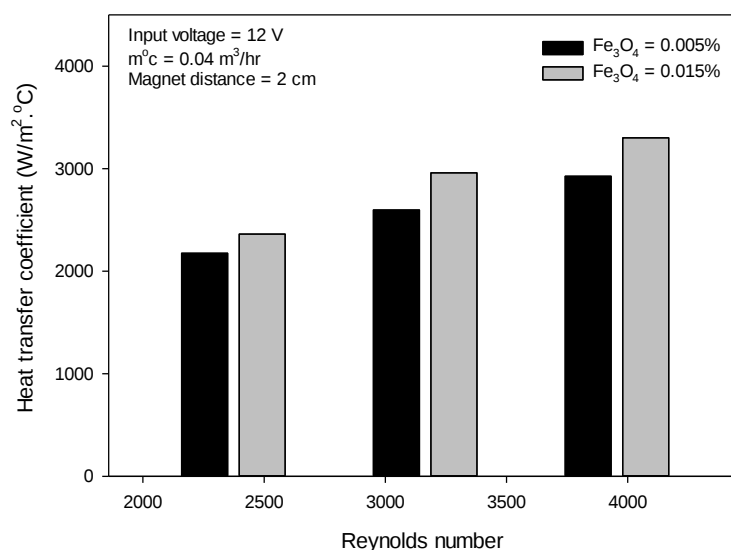
ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดลดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 13.37 W หรือคิดเป็น 4.33 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 71.14 W หรือคิดเป็น 18.67 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 73.29 W หรือคิดเป็น 18.14 %



ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

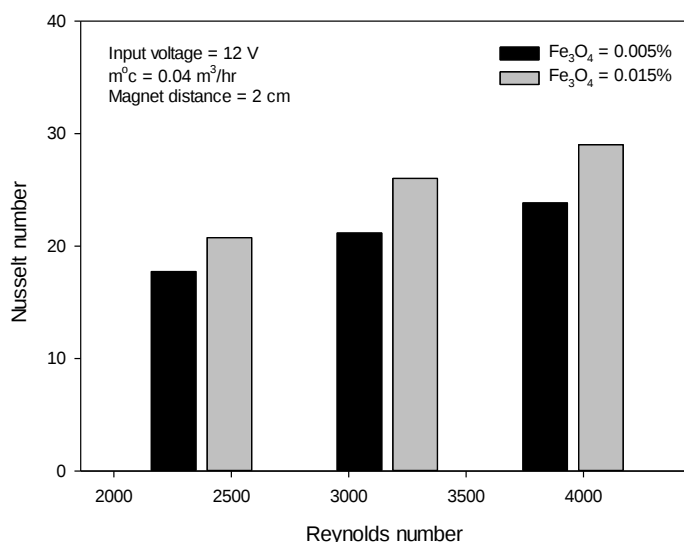
ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $13.37 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 4.33 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $71.15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 18.67 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $73.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 18.14 %



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.3.4 นัสเซลนัมเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

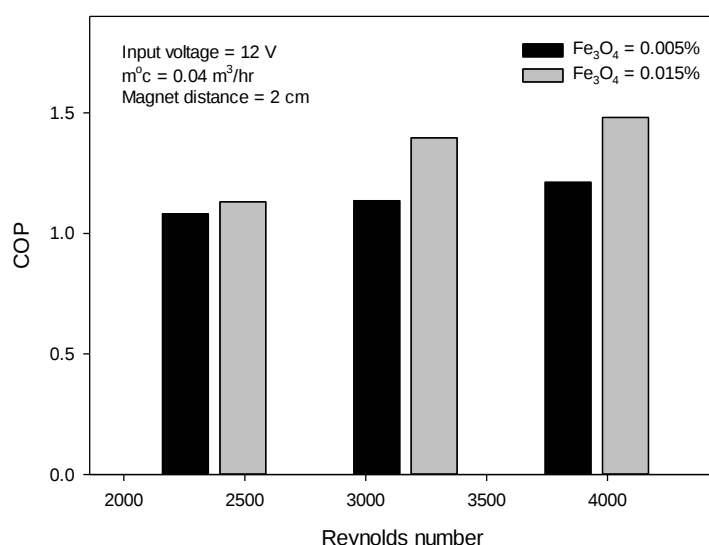
ภาพประกอบ 45 แสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่านัสเซลนัมเบอร์กับสูงตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % มีค่านัสเซลนัมเบอร์กับลดลง โดยที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 2,730 ค่านัสเซลนัมเบอร์กับของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 3.03 หรือคิดเป็น 14.58 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,164 ค่านัสเซลนัมเบอร์กับของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% อยู่ที่ 4.85 หรือคิดเป็น 18.65 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,955 ค่านัสเซลนัมเบอร์กับของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 5.18 หรือคิดเป็น 17.83 %



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.3.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

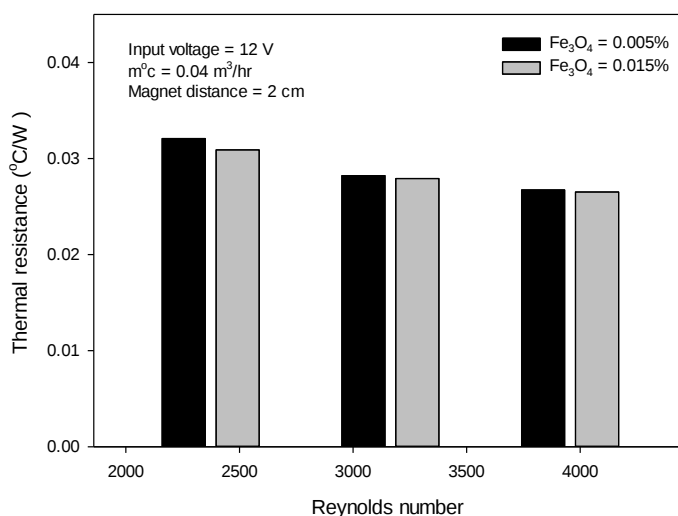
ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 0.04 m³/h เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับสูงตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับลดลง โดยที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 0.05 หรือคิดเป็น 4.33 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 0.21 หรือคิดเป็น 18.67 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ 0.27 หรือคิดเป็น 18.14 %



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.3.6 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวมกับกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ ของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % และ 0.015 % พบว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % มีค่าความต้านทานความร้อนรวมกับต่ำตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % มีค่าความต้านทานความร้อนรวมกับเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าความต้านทานความร้อนรวมกับของของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $0.0012 \text{ }^\circ\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 3.14 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าความต้านทานความร้อนรวมกับของของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $0.0003 \text{ }^\circ\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 1.06 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าความต้านทานความร้อนรวมกับของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.015 % ที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรความเข้มข้น 0.005 % อยู่ที่ $0.0002 \text{ }^\circ\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 0.75 %



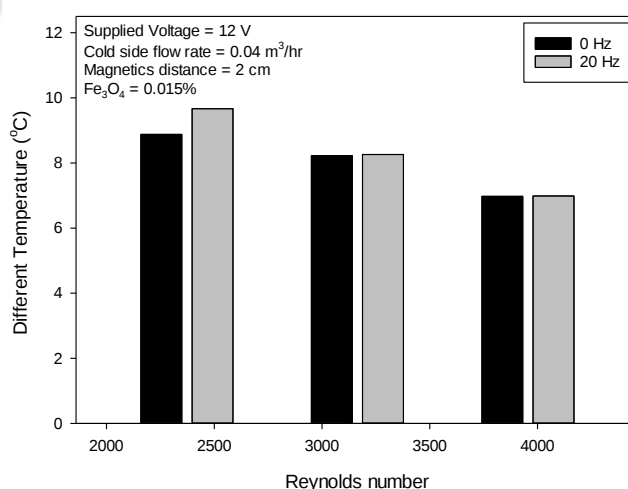
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวม กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

ในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ดังนั้น ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก โดยใช้ระยะห่างที่ 2 เซนติเมตร จากผลสรุปดังที่ได้กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าของไหลของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.015 % มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า ที่ความเข้มข้น 0.005 % จากผลสรุปดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากการเติมอนุภาคเฟอร์ไรต์นอกจากจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการนำความร้อนแล้ว หากผสมในอัตราที่เหมาะสมจะทำให้อนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกับของไหลและเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลและทำปฏิกิริยากับผนังความร้อน ค่าความต้านทานที่ผนังลดลง ส่งผลให้ผนังถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาหากผสมอนุภาคเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันสูญเสียเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงควรพิจารณาอัตราส่วนที่เหมาะสมทั้งในเชิงความร้อนและความดันของระบบ

4.4 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์กรณีของไหลเฟอร์โรที่การไหลแบบราบเรียบและไหลแบบเป็นจังหวะภายใต้เส้นแรงสนามแม่เหล็ก ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ 2 เซนติเมตร

4.4.1 ผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก (T_6-T_5) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

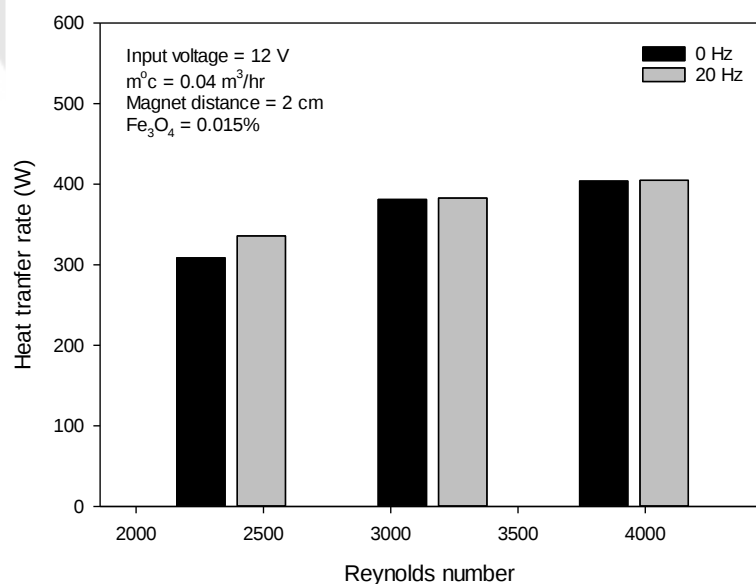
ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าผลต่างของอุณหภูมิสูงตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ มีค่าผลต่างของอุณหภูมิต่ำลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 2,730 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบอยู่ที่ 0.79°C หรือคิดเป็น 8.14 % ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,164 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.037°C หรือคิดเป็น 0.45 % ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,955 ค่าผลต่างของอุณหภูมิของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.013°C หรือคิดเป็น 0.18 %



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กระยะ 2 เซนติเมตร

4.4.2 การถ่ายเทความร้อน (Q) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

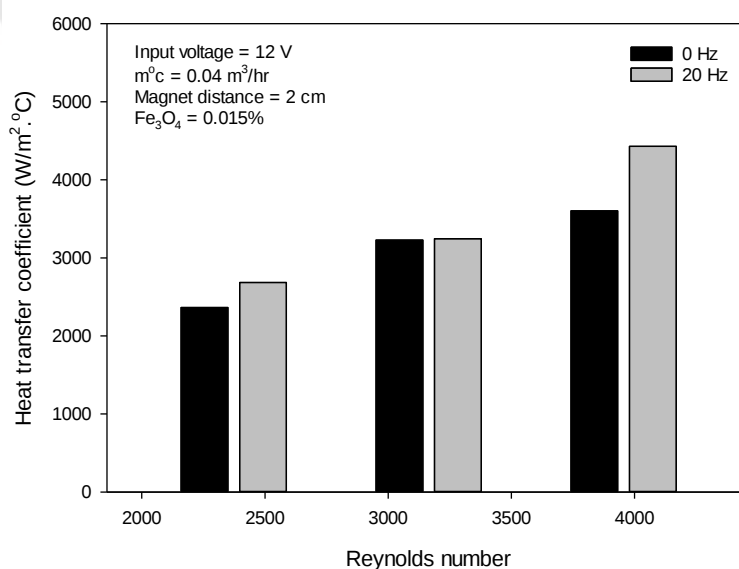
จากภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าอัตราถ่ายเทความร้อนสูงตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ มีค่าอัตราถ่ายเทความร้อนลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าอัตราถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 27.35 W หรือคิดเป็น 8.14 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าอัตราถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 1.73 W หรือคิดเป็น 0.45 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าอัตราถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.14 W หรือคิดเป็น 0.18 %



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

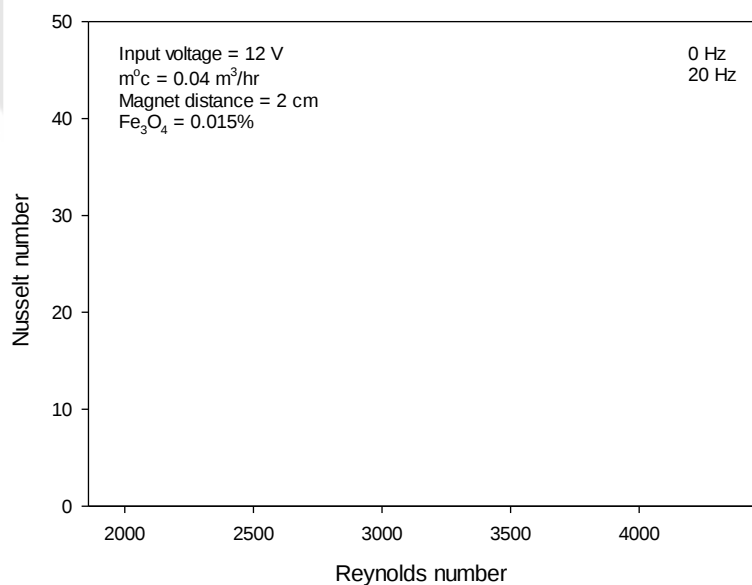
ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอร์ไรท์ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สูงตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์ไรท์ไหลแบบราบเรียบ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรท์ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรท์ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $320.73 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 11.95 % ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรท์ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรท์ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $16.73 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 0.52 % ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์ไรท์ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์ไรท์ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $825.78 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ หรือคิดเป็น 18.64 %



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.4.4 นัสเซลนัมเบอร์ (Nu) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

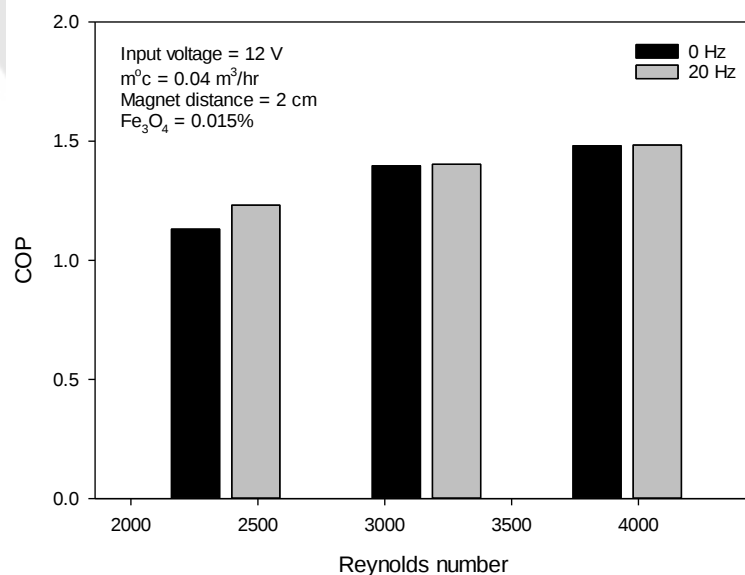
ภาพประกอบ 51 แสดงความสัมพันธ์ของค่านัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่านัสเซลนัมเบอร์สูงสุดลดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ มีค่านัสเซลนัมเบอร์ลดลง โดยที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 2,730 ค่านัสเซลนัมเบอร์ของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 2.82 หรือคิดเป็น 11.95 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,164 ค่านัสเซลนัมเบอร์ของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.15 หรือคิดเป็น 0.52 % ที่ค่าเรย์โนนัมเบอร์ 3,955 ค่านัสเซลนัมเบอร์ของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 7.26 หรือคิดเป็น 18.64 %



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.4.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

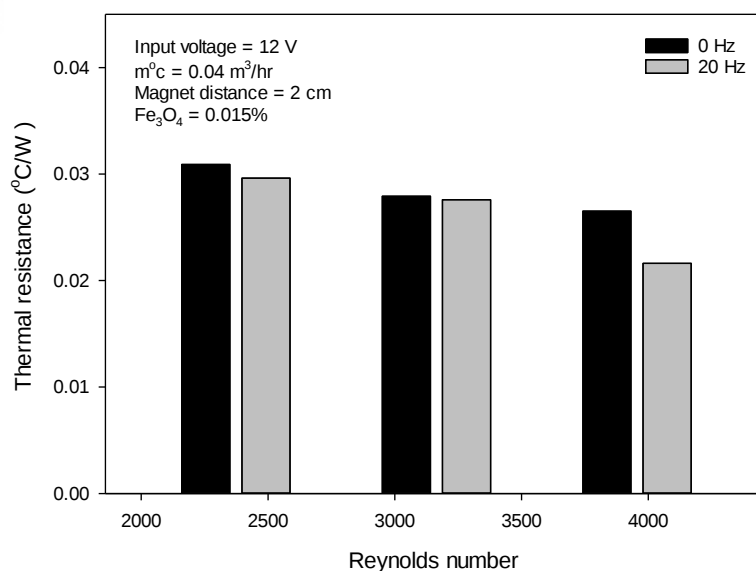
ภาพประกอบ 52 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดลดการทดลอง และที่ของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลง โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.10 หรือคิดเป็น 8.15 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.006 หรือคิดเป็น 0.45 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ 0.003 หรือคิดเป็น 0.18 %



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

4.4.6 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_{th}) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ภาพประกอบ 53 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลของด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz พบว่าของไหลเฟอโรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำตลอดการทดลอง และที่ของไหลเฟอโรที่ไหลแบบราบเรียบ มีค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,730 ค่าความต้านทานความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $0.001 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 1.09 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,164 ค่าความต้านทานความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $0.0003 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 0.45 % ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3,955 ค่าความต้านทานความร้อนของของไหลเฟอโรที่ไหลเป็นจังหวะ ที่ 20 Hz มีค่าน้อยกว่าของไหลเฟอโรที่ไหลแบบราบเรียบ อยู่ที่ $0.005 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ หรือคิดเป็น 18.49 %



ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยลักษณะการไหลของของไหลหล่อเย็นต่างกัน ไหลผ่านสนามแม่เหล็กกระยะ 2 เซนติเมตร

จากผลการทดลองข้างต้นจะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับเปลี่ยนการไหลจากแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) เป็นแบบการไหลแบบเป็นจังหวะ (Pulsating flow) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถสรุปได้ว่าการไหลแบบเป็นจังหวะจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งของไหลเฟอโร การไหลแบบเป็นจังหวะจะส่งผลให้ของไหลเฟอโรเกิดการเคลื่อนตัวแบบบิสระ (Brownian motion) ซึ่งผลที่ได้คือ อนุภาคเฟอโรเคลื่อนตัวอย่างไร้ทิศทางและเปลี่ยนแปลงการทำปฏิกิริยากับผนังความร้อน ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนผ่านของไหลเพิ่มมากขึ้น การประยุกต์ใช้การไหลแบบเป็นจังหวะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนจำเป็นต้องเติมอนุภาคนาโนเพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อนและพัฒนาการเคลื่อนตัวแบบบิสระ (Brownian motion) ให้เพิ่มมากขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาอัตราส่วนของอนุภาคที่เหมาะสมเนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นโลหะและมีน้ำหนัก หากเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนซึ่งก่อผลเสียกับระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับการระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้น้ำและของไหลเฟอโรโรเป็นของไหลหล่อเย็น ในการศึกษาจะทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ระบบระบายความร้อนด้วยโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์สามารถลดอุณหภูมิของของไหลก่อนที่จะเข้าสู่ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ได้ดีกว่าแบบไม่มีโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์

- การเพิ่มอัตราการไหลของของไหลด้านร้อนของโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ทำให้ความต้านทานความร้อนรวมลดลง แต่ผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออกด้านร้อน การถ่ายเทความร้อน, สัมประสิทธิ์สมรรถนะ, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์เพิ่มสูงขึ้น

- การใช้ของไหลเฟอโรโรในการระบายความร้อน ช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าน้ำ โดยของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร และน้ำ

- การใช้ของไหลเฟอโรโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กในการระบายความร้อน ช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีมากกว่า โดยความเข้มข้นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ไม่มีเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, 1, 1.5, 2.5, และ 3 เซนติเมตร

- การใช้ของไหลเฟอโรโรที่มีลักษณะการไหลแบบเป็นจังหวะในการระบายความร้อน ช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าการไหลแบบราบเรียบ โดยของไหลเฟอโรโรมีลักษณะการไหลแบบเป็นจังหวะ 20 เฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของไหลเฟอโรโรที่ไหลแบบต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับระบบระบายความร้อนโดยใช้โมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เป็นงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาจำนวนมาก แต่สำหรับการใช้ของไหลเฟอโรที่ไหลผ่านเส้นแรงสนามแม่เหล็กนั้นยังไม่มีผู้ศึกษาจำนวนน้อย และการศึกษาเกี่ยวกับระบบระบายความร้อนโดยใช้โมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ยังสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบอื่น ๆ ได้อีกมากมาย งานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาร่วมกับการระบายความร้อนแบบเตอริรยนต์ไฟฟ้าบางส่วนเท่านั้น เพราะว่ามีขีดจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ทำให้ไม่สามารถทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนได้ครอบคลุมทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการเพิ่มเติมเงื่อนไขขอบเขตหรืออุปกรณ์บางอย่างเช่น

- เปลี่ยนของไหลหล่อเย็นที่ใช้ในการระบายความร้อน
- ทำความสะอาดทุกครั้งหลังใช้ของไหลเฟอโร
- ใช้ระบายความร้อนจริงจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้จริงในปัจจุบัน
- ออกแบบชุดครีระบายความร้อนใหม่
- เพิ่มความถี่ในการไหลแบบเป็นจังหวะ

บรรณานุกรม

- Ahammed, N., Asirvatham, L. G., และ Wongwises, S. (2016). Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 81-90.
- Azizian, R., Doroodchi, E., McKrell, T., Buongiorno, J., Hu, L. W., และ Moghtaderi, B. (2014). Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68, 94-109.
- Cai, Y., Liu, D., Zhao, F.-Y., และ Tang, J.-F. (2016). Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices. *Energy Conversion and Management*, 124, 203-211.
- Cherief, W., Avenas, Y., Ferrouillat, S., Kedous-Lebouc, A., Jossic, L., และ Petit, M. (2017). Parameters affecting forced convection enhancement in ferrofluid cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, 123, 156-166.
- Gao, Y.-W., Lv, H., Wang, X.-D., และ Yan, W.-M. (2017). Enhanced Peltier cooling of two-stage thermoelectric cooler via pulse currents. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 656-663.
- Gökçek, M., และ Şahin, F. (2017). Experimental performance investigation of minichannel water cooled-thermoelectric refrigerator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 54-62.
- Hu, H. M., Ge, T. S., Dai, Y. J., และ Wang, R. Z. (2015). Experimental investigation on two-stage thermoelectric cooling system adopted in isoelectric focusing. *International Journal of Refrigeration*, 53, 1-12.
- Hu, H. M., Ge, T. S., Dai, Y. J., และ Wang, R. Z. (2016). Experimental study on water-cooled thermoelectric cooler for CPU under severe environment. *International Journal of Refrigeration*, 62, 30-38.
- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A., และ Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822-827.

- Malmir-Chegini, Y., และ Amanifard, N. (2019). Heat transfer enhancement inside semi-insulated horizontal pipe by controlling the secondary flow of oil-based ferro-fluid in the presence of non-uniform magnetic field: A general correlation for the Nusselt number. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113839.
- Rao, Z., และ Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571.
- Sadighi Dizaji, H., Jafarmadar, S., Khalilarya, S., และ Moosavi, A. (2016). An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit. *Applied Energy*, 181, 357-366.
- Sun, X., Zhang, L., และ Liao, S. (2017). Performance of a thermoelectric cooling system integrated with a gravity-assisted heat pipe for cooling electronics. *Applied Thermal Engineering*, 116, 433-444.
- Tan, S. O., และ Demirel, H. (2015). Performance and cooling efficiency of thermoelectric modules on server central processing unit and Northbridge. *Computers & Electrical Engineering*, 46, 46-55.
- Wang, Y., Shi, Y., และ Liu, D. (2017). Performance analysis and experimental study on thermoelectric cooling system coupling with heat pipe. *Procedia Engineering*, 205, 871-878.
- Wiriyasart, S., Hommalee, C., และ Naphon, P. (2019). Thermal cooling enhancement of dual processors computer with thermoelectric air cooler module. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100445.
- Wiriyasart, S., Hommalee, C., Prurapark, R., Srichat, A., และ Naphon, P. (2019). Thermal efficiency enhancement of thermoelectric module system for cold-hot water dispenser; Phase II. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100520.
- Wiriyasart, S., Naphon, P., และ Hommalee, C. (2019). Sensible air cool-warm fan with thermoelectric module systems development. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100369.
- Zhao, D., และ Tan, G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering*, 66(1), 15-24.

Zhu, L., Tan, H., และ Yu, J. (2013). Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*, 76, 685-690.

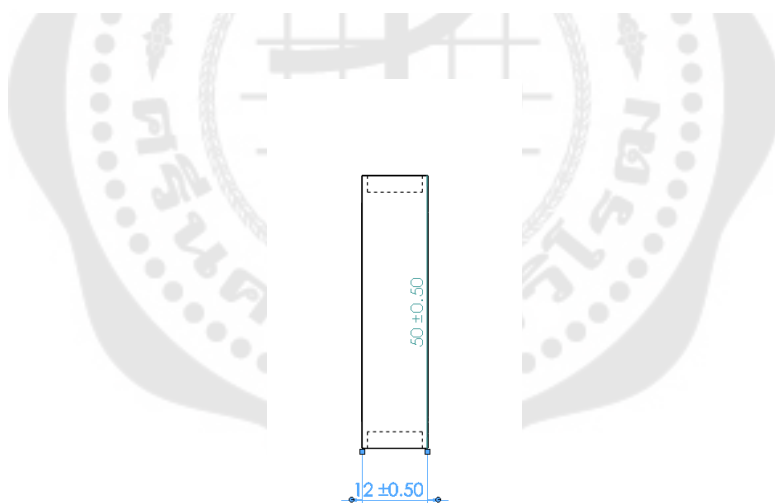
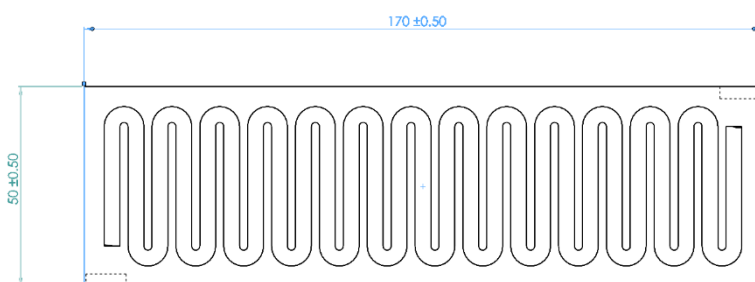
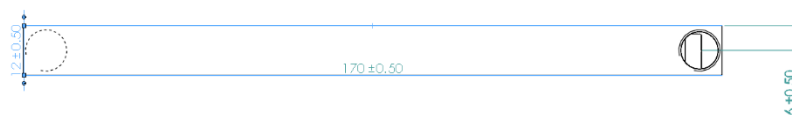




ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ชุดคำบรรยายความอ่าน



รายละเอียดของชุดครีประบายความร้อน



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณการระบายความร้อนด้วยน้ำ

ชุดครีประบายความร้อนแบบที่ 1 แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ใช้น้ำเป็นของไหล อุณหภูมิของแบตเตอรี่เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ 30 ลิตร/ชั่วโมง อัตราการไหลด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ 30 ลิตร/ชั่วโมง

$$Q_w \text{ อัตราการไหลของน้ำ} = 8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$T_{in} \text{ อุณหภูมิของไหลทางเข้า} = 25.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{out} \text{ อุณหภูมิของไหลทางออก} = 28.22 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_b \text{ อุณหภูมิที่ฐานครีบ} = 28.90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{in} \text{ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบ} = 272.8 \text{ W}$$

$$\rho_w \text{ ความหนาแน่นของน้ำ} = 997.1 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$C_{p_w} \text{ ความร้อนจำเพาะของน้ำ} = 4180 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$\mu_w \text{ ความหนืดพลวัตของน้ำ} = 0.000894 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

$$k_w \text{ ค่าการนำความร้อนของน้ำ} = 0.606265 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

ข้อมูลจากชุดครีประบายความร้อน

$$W \text{ ความกว้าง} = 0.05 \text{ m}$$

$$L \text{ ความยาว} = 0.13 \text{ m}$$

$$H \text{ ความสูง} = 0.012 \text{ m}$$

$$D \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของเข้า} = 0.005 \text{ m}$$

$$A_{in} \text{ พื้นที่ผิวของทางเข้า} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_{total} \text{ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด} = 0.033216 \text{ m}^2$$

1. อัตราการไหลเชิงมวล Mass flow rate ($\dot{m}$)

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho_w Q_w \\ &= 990.1 \times (8.33 \times 10^{-6}) \\ &= 0.00825 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม Heat transfer rate (Q_{total})

$$\begin{aligned}Q_{total} &= \dot{m} C_{p_w} \Delta T \\ &= 0.00825 \times 4180 \times (28.22 - 25.20) \\ &= 111.49 \text{ W}\end{aligned}$$

3. เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ Reynold no. (Re)

$$\begin{aligned}Re &= \frac{\rho_w Q_w D_e}{\mu_w A_{in}} \\ &= [997.1 \times (8.33 \times 10^{-6}) \times 0.005] / (0.000894 \times 1.96 \times 10^{-5}) \\ &= 2370.064\end{aligned}$$

4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน Heat Transfer coefficient (h)

$$\begin{aligned}h &= \frac{Q_{total}}{A_{total} (T_b - T_{in})} \\ &= 111.49 / [0.032165 \times (28.90 - 25.10)] \\ &= 826.84 \text{ W/m} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

5. นัสเซลต์นัมเบอร์ Nusselt no. (Nu)

$$\begin{aligned}Nu &= \frac{h D_e}{k_w} \\ &= (826.84 \times 0.005) / 0.606265 \\ &= 7.116\end{aligned}$$

6. ความต้านทานความร้อน Total thermal resistance (R_{th})

$$\begin{aligned} R_{th} &= \frac{T_b - T_i}{Q_{in}} \\ &= (28.90 - 25.01) / 272.8 \\ &= 0.0143 \text{ } ^\circ\text{C/W} \end{aligned}$$



ตัวอย่างการคำนวณการระบายความร้อนด้วยของไหลนาโน

คุณสมบัติของของไหลเฟอร์โร (Fe_3O_4) 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

1. ความหนาแน่นของของไหลนาโน

$$\begin{aligned}\rho_{nf} &= \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_w \\ &= (0.00005 \times 5180) + [(1-0.00005) \times (997.1)] \\ &= 997.309 \text{ kg / m}^3\end{aligned}$$

2. ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

$$\begin{aligned}C_{p_{nf}} &= \phi C_{p_p} + (1-\phi) C_{p_w} \\ &= (0.00005 \times 670) + [(1-0.00005) \times 4180] \\ &= 4179.824 \text{ J / kg} \cdot K\end{aligned}$$

3. ค่าความหนืดสัมบูรณ์

$$\begin{aligned}\mu_{nf} &= (1 + 2.5\phi) \mu_w \\ &= [1 + (2.5 \times 0.00005)] \times 0.000894 \\ &= 0.0008941 \text{ kg / m} \cdot s\end{aligned}$$

4. ค่าการนำความร้อน

$$\begin{aligned}k_{nf} &= \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + 2\phi(k_w - k_p)} \right] k_w \\ &= \left[\frac{11.7 + 2(0.606) - 2(0.00005)(0.606 - 11.7)}{11.7 + 2(0.606) + 2(0.00005)(0.606 - 11.7)} \right] 0.606 \\ &= 0.6138 \text{ W / m} \cdot K\end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณการระบายความร้อนด้วยของไหลนาโน

คุณสมบัติของของไหลเฟอร์โร (Fe_3O_4) 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

1. ความหนาแน่นของของไหลนาโน

$$\begin{aligned}\rho_{nf} &= \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_w \\ &= (0.00015 \times 5180) + [(1-0.00015) \times (997.1)] \\ &= 997.730 \text{ kg / m}^3\end{aligned}$$

2. ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

$$\begin{aligned}C_{p_{nf}} &= \phi C_{p_p} + (1-\phi) C_{p_w} \\ &= (0.00015 \times 670) + [(1-0.00015) \times 4180] \\ &= 4179.4735 \text{ J / kg} \cdot K\end{aligned}$$

3. ค่าความหนืดสัมบูรณ์

$$\begin{aligned}\mu_{nf} &= (1 + 2.5\phi) \mu_w \\ &= [1 + (2.5 \times 0.00015)] \times 0.000894 \\ &= 0.0008943 \text{ kg / m} \cdot s\end{aligned}$$

4. ค่าการนำความร้อน

$$\begin{aligned}k_{nf} &= \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + 2\phi(k_w - k_p)} \right] k_w \\ &= \left[\frac{11.7 + 2(0.606) - 2(0.00015)(0.606 - 11.7)}{11.7 + 2(0.606) + 2(0.00015)(0.606 - 11.7)} \right] 0.606 \\ &= 0.6059 \text{ W / m} \cdot K\end{aligned}$$



ภาคผนวก ค
ตารางผลการทดลอง

ตาราง 1 คุณสมบัติการทดลองชุดเครื่องระบายความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ โดยใช้ของไหล
เฟอร์ไรต์ (Fe_3O_4) เป็นของไหลหล่อเย็นที่ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไหลผ่าน เส้น
แรงสนามแม่เหล็ก

Cold side flow rate	Hot side flow rate	Magnetic distance	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$T_{Battery}$	$T_{TEC\ hot}$	$T_{TEC\ cold}$
40	30	0	23.09	22.26	-	-	24.87	33.19	40	34.03	22.19
	40	0	23.17	22.04	-	-	25.35	31.60	40	34.03	21.85
	50	0	23.09	21.66	-	-	24.90	30.31	40	33.31	21.51
40	30	1	22.96	21.44	-	-	24.77	33.13	40	33.92	21.63
	40	1	22.71	21.22	-	-	25.22	31.85	40	33.46	21.37
	50	1	22.43	0.91	-	-	25.05	30.53	40	32.69	21.10
40	30	1.5	25.85	24.89	-	-	24.92	33.39	40	33.95	23.69
	40	1.5	25.30	24.27	-	-	24.57	31.26	40	32.78	23.26
	50	1.5	23.61	22.48	-	-	25.18	30.72	40	32.53	21.89
40	30	2	24.99	23.56	-	-	24.73	33.22	40	33.39	23.63
	40	2	24.63	23.17	-	-	25.14	31.83	40	32.84	23.26
	50	2	24.12	22.60	-	-	25.25	30.96	40	32.54	22.73
40	30	2.5	23.64	22.70	-	-	24.61	33.10	40	33.38	22.04
	40	2.5	23.45	22.40	-	-	24.78	31.12	40	32.52	23.98
	50	2.5	23.44	22.40	-	-	24.44	30.10	40	32.18	21.62
40	30	3	22.68	21.34	-	-	25.16	33.65	40	34.05	21.65
	40	3	22.51	21.10	-	-	25.44	31.77	40	33.17	21.69
	50	3	23.15	21.62	-	-	25.47	31.15	40	33.46	21.77

ตาราง 2 คุณสมบัติการทดลองชุดเครื่องระบายความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ โดยใช้ของไหล
เฟอร์ไรต์ (Fe_3O_4) เป็นของไหลหล่อเย็นที่ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไหลผ่าน
เส้นแรงสนามแม่เหล็ก 2 เซนติเมตร

Cold side flow rate	Hot side flow rate	Pulsating	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$T_{Battery}$	$T_{TEC\ hot}$	$T_{TEC\ cold}$
40	30	0	24.18	22.72	-	-	25.20	34.08	40	33.69	21.24
	40	0	23.69	21.72	-	-	24.59	32.92	40	32.31	20.47
	50	0	22.96	21.32	-	-	24.51	31.49	40	31.75	19.82
40	30	20	23.50	21.84	-	-	24.61	34.28	40	32.31	20.47
	40	20	22.84	21.22	-	-	24.38	32.92	40	31.91	19.47
	50	20	22.04	20.45	-	-	24.96	31.8	40	30.59	18.73

ตาราง 3 อุณหภูมิการทดลองชุดเครื่องระบายความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ โดยใช้ของไหลเฟอร์ไรต์ (Fe_3O_4) เป็นของไหลหล่อเย็น

Cold side flow rate	Hot side flow rate	% Ferro fluid	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$T_{Battery}$	$T_{TEC\ hot}$	$T_{TEC\ cold}$
	30	0.005	26.23	25.84	-	-	31.23	25.88	40	32.75	23.98
30	40	0.005	24.21	24.92	-	-	29.68	25.29	40	32.00	21.99
	50	0.005	25.32	25.68	-	-	30.43	27.1	40	33.56	23.39
	30	0.015	24.55	24.79	-	-	31.98	26.30	40	31.78	22.39
30	40	0.015	23.44	24.45	-	-	31.26	26.08	40	31.75	21.15
	50	0.015	23.13	23.52	-	-	30.31	26.50	40	31.31	20.78

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวปณยวีร์ สุขสุสร
วัน เดือน ปี เกิด	25 กุมภาพันธ์ 2540
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2657 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ พ.ศ. 2560 ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	20 หมู่ 5 ตำบล สะพานไทย อำเภอบางบาล จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13250

