การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อประจุแบตเตอรี่

ANALYSIS AND DESIGN OF POWER GENERATION FROM WASTE HEAT OF THE AIR CONDITIONING SYSTEM BY THERMO ELECTRIC TO CHARGE THE BATTERY

คณิต พิมพ์คำไหล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อประจุแบตเตอรี่

คณิต พิมพ์คำไหล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อประจุแบตเตอรี่

Analysis and design of power generation from waste heat of air conditioning system by Thermo Electric for charging battery.

ชื่อ-นามสกุล นายคณิต พิมพ์คำไหล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, Ph.D.)

.... กรรมการ

(อาจารย์ณฐภัทร พันธ์คง, Ph.D.)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, D.Eng)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ เดือน พ.ศ.

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อประจุแบตเตอรี่
ชื่อ – นามสกุล	นายคณิต พิมพ์คำไหล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อประจุแบตเตอรี่ เนื่องจากเครื่องปรับอากาศเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เครื่องปรับอากาศอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนออกจากห้องปิดผ่านสารทำความเย็นและระบายความร้อนออกจากคอนเดนเซอร์ด้วยพัดลม ความร้อนนี้สามารถนำกลับมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค โดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองด้าน พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะนำไปประจุแบตเตอรี่ขนาดพิกัด 12 โวลต์ ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อใช้ในครัวเรือนได้ต่อไป

งานวิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูล TEG – 12750D ด้วยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พร้อมทั้งสร้างชุดต้นแบบและทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบ โดยทำการต่อเทอร์โมอิเล็คทริคแบบอนุกรมกันจำนวน 5 โมดูล แล้วนำมาขนานกันจำนวน 2 ชุด แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรยกระดับแรงดันและควบคุมระดับแรงดันเพื่อทำการประจุแบตเตอรี่ขนาดพิกัด 12 โวลต์

จากผลการทดลองการทำงานต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่า อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้านมีความแตกต่างระหว่างความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศและน้ำเย็นที่ได้จากการปรับอากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ย 40 องศาเซลเซียส สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่พิกัดแรงดัน 12 โวลต์ ด้วยกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนสูญเปล่าที่ได้จากเครื่องปรับอากาศสามารถพัฒนาให้ใช้เป็นพลังงานทดแทนในครัวเรือนได้

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็คทริค วงจรแปลงผันไฟตรง ความร้อนสูญเปล่าจากเครื่องปรับอากาศ

Thesis Title	Analysis and Design of Power Generation from Waste Heat of Air Conditioning System by Thermoelectric for Charging Battery.
Name – Surname	Mr. Kanit Pimkhamlai
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing
Academic Year	2014

ABSTRACT

This thesis is to study and analyze an application of using thermoelectric technology to produce electrical power from waste heat of air conditioning system. Since the split type air conditioning systems have been used increasingly, the energy consumption is also increase. According to the operation of air conditioning system, it generates waste heat from the condensing unit. The air conditioning system transfers heat from a closed room through the refrigerants and then the system removes heat via condenser unit. This waste heat of air conditioning system can be used to generate electric power from thermoelectric module for charging a 12 V battery and this can be used for renewable energy in households.

The research proposed a design and construction of power generation unit by thermoelectric modules TEG – 12750D. The designed unit was analyzed by the simulation using MATLAB/Simulink program. The prototype was developed and tested in order to investigate the results and compared with the simulation results. The designed thermoelectric unit was connected in from of 5 modules in series for 1 string and 2 strings connected in parallel. The power from the such module was seat into the DC – DC converter inorder to control the 12V battery charging.

From the experimental result, it shows that the prototype has temperature difference between waste heat and cooling water from evaporator at 40 degrees Celsius. This can generate power for charging a 12 V battery by 30 mA. When comparing experimental results with simulation results , both results are similar. This can prove that the waste heat from split type air conditioning system can be used for power generation for renewable energy household.

Keywords: thermoelectric, DC-DC converter, waste heat of air conditioning system

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการให้คำแนะนำด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำรวมถึงประสบการณ์ต่างๆที่เป็นแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณฐภัทร พันธ์คง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณครูสุพจน์ วรธิพรหมมา ครูแผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทฺโธ อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา ที่กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม Math Lab ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของชุดทดลอง และเอกสาร ข้อมูลต่างๆตลอดจนข้อเสนอแนะทั้งในภาคทฤษฎีและภาคการปฏิบัติอันเป็นประโยชน์ในการทดสอบคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริค จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินผลรับรองต้นแบบชิ้นงานวิจัยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ตรวจเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งยังสละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำอันเป็นผลให้งานวิจัยมีความชัดเจน ครบถ้วนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษาและวิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทฺโธ ที่ได้ให้เวลาและมอบทุนสนับสนุนเพื่อพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลที่เป็นกำลังใจคือ บิดา มารดา ตลอดจนคุณวริศรา พิมพ์คำไหล ที่คอยดูแลบุตร-ธิดาและผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดเวลาอีกทั้งยังเป็นกำลังใจที่คอยผลักดันให้การวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณิต พิมพ์คำไหล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย……	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……	(4)
กิตติกรรมประกาศ……	(5)
สารบัญ……	(6)
สารบัญตาราง……	(10)
สารบัญภาพ……	(12)
บทที่ 1 บทนำ……	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา……	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา……	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์……	2
1.5 ขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์……	3
1.6 ข้อจำกัดของการทำวิทยานิพนธ์……	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ……	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……	5
2.1 เทอร์โมอิเล็คทริค……	6
2.1.1 เทอร์โมอิเล็คทริค……	6
2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็คทริค……	6
2.1.2.1. กลุ่มโลหะ……	7
2.1.2.2. กลุ่มสารกึ่งตัวนำและฉนวน……	7
2.1.3 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็คทริค……	11
2.1.3.1. ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)……	11
2.1.3.2. ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect)……	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.3.3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect).................................... 16

2.1.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง.. 16

2.1.4.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง.. 16

2.1.5 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง.. 17

2.2.หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค.. 19

2.3.โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็คทริค... 22

2.4. ประเภทของเทอร์โมอิเล็กทริค.. 25

2.4.1. เทอร์โมอิเล็กทริคแบบชั้นเดียว.. 25

2.4.2. เทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้น... 26

2.5. ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจากความร้อน.. 27

2.6 วงจรทบระดับแรงดัน... 28

2.6.1 เงื่อนไขในการทำงานของวงจรทบระดับแรงดัน... 29

2.6.2 หลักการทำงานของวงจรทบระดับแรงดัน.. 29

2.6.3 การคำนวณค่าในวงจรทบระดับแรงดัน 31

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 36

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.. 39

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.. 39

3.2 การทดลองคุณสมบัติการต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.......................... 40

3.3 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik.. 42

3.4 สร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค... 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1 ตรวจวัดอุณหภูมิทางด้านคอนเดนเซอร์เพื่อหาจุดติดตั้งชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้า.. 48
3.4.2 ดำเนินการติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ.. 49
3.4.3 ติดตั้งอุปกรณ์ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค...................................... 50
3.4.4 ทดลองและเก็บข้อมูลผลการทดลองผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค 52
บทที่ 4 ผลการทดลอง………………………………………………...……..………... 57
4.1 การทดลองต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 57
4.1.1 คุณสมบัติของแต่ละโมดูล.. 59
4.1.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 61
4.1.3 การขนานของของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 63
4.1.4 การอนุกรมและขนานของของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค............................... 65
4.2 ผลการทดลองคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเปรียบเทียบผลกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik... 66
4.2.1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 66
4.2.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค... 66
4.2.3 การขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 67
4.2.4 การอนุกรมและขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.............................. 67
4.3 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik...................... 68
4.4 การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค เพื่อประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าฉุกเฉิน................................. 72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ……………..……………………...…...…………... 79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 สรุปผลการวิจัย.. 79
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.. 80
รายการอ้างอิง.. 82
ภาคผนวก.. 86
ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรม Matlab/Simulink.. 87
ภาคผนวก ข m-file Matlab/Simulink.. 100
ภาคผนวก ค เอกสารข้อมูลเทอร์โมอิเล็กทริค.. 105
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.. 107
ประวัติผู้เขียน.. 148

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติการผันไฟฟ้าจากความร้อนของโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน ที่ 300 K ที่มา [32]………..	9
ตารางที่ 2.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง …...…………………………..	18
ตารางที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง …..…..………………....	18
ตารางที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ …..…………………………..	19
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันที่ค่า Duty Cycle ต่างๆ……...	33
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของโมดูลที่1 (ริมซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c = 10 °C………………………..	59
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 2 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c = 10 °C………………	59
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 3 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c = 10 °C………………	60
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวริมขวา) ที่T_h=190 °C , T_c = 10 °C……………………..	60
ตารางที่ 4.5 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1 และ 2 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)………………………….	61
ตารางที่ 4.6 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1,2 และ 3 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)…………………………	62
ตารางที่ 4.7 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1,2,3 และ 4 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)………………………	62
ตารางที่ 4.8 ผลการขนานโมดูลที่ 1 และ 2 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)……………………………	63
ตารางที่ 4.9 ผลการขนานโมดูลที่ 1,2 และ 3 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)………………………….	64
ตารางที่ 4.10 ผลการขนานโมดูลที่ 1, 2, 3 และ4 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)……………………..	64
ตารางที่ 4.11 ผลการอนุกรมและขนานโมดูล (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)…………………………	65
ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C…………………………………………………………………………	66
ตารางที่ 4.13 ผลการอนุกรมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C…………………………………………………………………………	67
ตารางที่ 4.14 ผลการขนานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35	67
ตารางที่ 4.15 ผลการอนุกรมและขนานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C……………………………………………………………	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้ากับคอนเดนเซอร์.. 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของซีเบค (α) สภาพนำไฟฟ้า σ และ สภาพนำความร้อนแบบแลซทิซ (K_L) และแบบอิเล็กโทรนิก (K_e) ที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของพาหะประจุอิสระ n 9

ภาพที่ 2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า.. 11

ภาพที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์ซีเบค….. 13

ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ power factor และ Seebeck coefficient......................... 13

ภาพที่ 2.5 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ….. 14

ภาพที่ 2.6 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด n.......................... 15

ภาพที่ 2.7 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด p.......................... 15

ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์ทอมสัน ……………………....... 16

ภาพที่ 2.9 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้ พลังงานแหล่งต่าง ๆ.. 17

ภาพที่ 2.10 การทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค.. 20

ภาพที่ 2.11 วงจรการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค... 21

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็คทริคและวงจรทางไฟฟ้า.................................... 22

ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริค.. 22

ภาพที่ 2.14 แผ่นฉนวนที่จัดเรียงเทอร์โมอิลิเมนต์.. 23

ภาพที่ 2.15 ภาพขยายส่วนฐานและเทอร์โมอิลิเมนต์.. 23

ภาพที่ 2.16 เทอร์โมอิเล็กทริคแบบชั้นเดียว (Single stage module) …... 26

ภาพที่ 2.17 เทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้น (Multistage Module) ….. 26

ภาพที่ 2.18 วงจรทบระดับแรงดัน.. 28

ภาพที่ 2.19 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันขณะสวิตซ์นำกระแส.................................... 29

ภาพที่ 2.20 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส............................. 30

ภาพที่ 2.21 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรทบระดับแรงดัน.. 31

ภาพที่ 2.22 รูปคลื่นแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อ 0.5............... 32

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า Duty Cycle ของวงจรทบระดับแรงดัน........ 33

ภาพที่ 2.24 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรทบระดับแรงดัน...... 35

ภาพที่ 3.1 วงจรการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค........ 40

ภาพที่ 3.2 การติดตั้งชุดเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล........ 41

ภาพที่ 3.3 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน........ 41

ภาพที่ 3.4 จำลองการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik........ 43

ภาพที่ 3.5 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik........ 44

ภาพที่ 3.6 จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik........ 44

ภาพที่ 3.7 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik........ 45

ภาพที่ 3.8 ระบบต้นแบบที่นำเสนอ........ 46

ภาพที่ 3.9 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเจเนอเรเตอร์........ 46

ภาพที่ 3.10 ชุดอัดประจุไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเจนเนอร์เรเตอร์........ 47

ภาพที่ 3.11 (ก)โมดูลเพิ่มแรงดัน DC Boost Converter รุ่น Low Voltage Boost (ข)อินเวอร์เตอร์ DC to AC ขนาด 150 วัตต์ และ(ค) ชุดไฟฉุกเฉินแรงดันขนาด 12 โวลท์........ 47

ภาพที่ 3.12 ตรวจวัดอุณหภูมิด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ........ 48

ภาพที่ 3.13 ตรวจวัดอุณหภูมิด้านหลังชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ........ 48

ภาพที่ 3.14 ติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ........ 49

ภาพที่ 3.15 ติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ........ 49

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.16 ติดตั้งอุปกรณ์ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค... 50

ภาพที่ 3.17 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค................................ 50

ภาพที่ 3.18 เดินสายไฟฟ้าอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค.................... 51

ภาพที่ 3.19 ทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค............. 51

ภาพที่ 3.20 ทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อ
ตรวจสอบหาจุดบกพร่องของชุดผลิตไฟฟ้า.. 52

ภาพที่ 3.21 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของชุดเทอร์โมอิเล็กทริค......................... 53

ภาพที่ 3.22 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของชุด
เทอร์โมอิเล็กทริค... 53

ภาพที่ 3.23 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบอุณหภูมิชุดคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศแบบ
แยกส่วนขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน.. 54

ภาพที่ 3.24 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบอุณหภูมิชุดคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศแบบ
แยกส่วนขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน.. 54

ภาพที่ 3.25 บันทึกและเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าชุดสาธิตขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน............. 55

ภาพที่ 3.26 แสดงการผลิตไฟฟ้าชาร์จประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองของชุดสาธิตขณะที่
เครื่องปรับอากาศทำงาน.. 55

ภาพที่ 4.1 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน.. 58

ภาพที่ 4.2 การวัดค่าการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค... 58

ภาพที่ 4.3 กราฟคุณสมบัติของโมดูล.. 60

ภาพที่ 4.4 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรม................... 63

ภาพที่ 4.5 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบขนาน..................... 64

ภาพที่ 4.6 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรมและขนาน.... 65

ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik.............. 68

ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริค
ด้วยโปรแกรม Matlab simulik.. 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik 69

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik 70

ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข) 70

ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข) 71

ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข) 71

ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข) 72

ภาพที่ 4.15 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรมและขนานที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ 74

ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข) 75

ภาพที่ 4.17 คลื่นสัญญาณแรงดันขาออกของเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูที่ต่ออนุกรมและขนานกัน 75

ภาพที่ 4.18 คลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้าก่อนทำการวัด 76

ภาพที่ 4.19 คลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้า 77

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันแหล่งพลังงานต่าง ๆ เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก พลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล คือ ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์และน้ำมันดีเซล พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานจากชีวมวล ยังมีกำลังการผลิตที่น้อยมาก เป็นผลให้การผลิตไฟฟ้ามีราคาต้นทุนที่แพงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดโลก ได้มีการคิดค้นและนำเทคโนโลยีต่างๆรวมถึงแหล่งพลังงานที่บริสุทธ์ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เช่นการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์ ความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งความร้อนต่างๆมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงาน และได้มีการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเทอร์โมอิเล็คทริคในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นการผลิตไฟฟ้าจากเตาหุงต้ม [1] การใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากตะเกียงเป็นแหล่งผลิตพลังงานให้กับเทอร์โมอิเล็คทริค[2]

จากการใช้พลังงานในปัจจุบันทำให้พลังงานเข้าสู่สภาวะขาดแคลน รวมทั้งสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันด้วย พลังงานทดแทนจากแหล่งต่างๆได้ถูกคิดค้นและนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานหลัก อย่างไรก็ดียังไม่สามารถที่จะนำมาใช้ทดแทนได้จริงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของพลังงานทดแทนน้อย

จากปัญหานี้จึงจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการนำพลังงานจากแหล่งอื่นๆ มาช่วยในการประหยัดพลังงานด้วย ระบบปรับอากาศเป็นระบบที่มีอยู่แทบทุกที่ในประเทศไทยและเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากอีกทั้งยังสร้างความร้อนขึ้นด้วยในตัวระบบเอง จากความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นเราสามารถใช้พลังงานเหล่านั้นนำกลับมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ด้วยการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็คทริคเข้ามาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์และยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีขนาดเล็กกะทัดรัดโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริคโดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้มาผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานจากความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยการสร้างชุดผลิตกระแสไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็คทริคแล้วทำการทดสอบหาประสิทธิภาพ

ของวงจร ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ข้อจำกัดของประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าไม่ได้อยู่ที่แผ่นโมดูลเทอร์โมอิเล็คทริคเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับการดูดซับความร้อนทางด้านที่ป้อนความร้อนและการระบายความร้อนให้กับด้านเย็นด้วย เซลล์ผันไฟฟ้าจากความร้อน อาจไม่ใช่แนวทางที่ให้ประสิทธิภาพการผันพลังงานสูงสุด แต่จัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาด และอาจพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ราคาถูก ที่มีประสิทธิผล ให้ปริมาณไฟฟ้าต่อบทบาทของการลงทุน มีค่าสูงพอที่จะนำมาใช้งานได้จริงในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์การทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค

1.2.2 เพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองการทำงานชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ประเมินผลการทำงานชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.2.4 เพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็คทริคจากความร้อนสูญเปล่าของระบบเครื่องปรับอากาศเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง

1.2.5 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็คทริค

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 การใช้พลังงานความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคที่สร้างขึ้น สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้

1.3.2 ทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคจากพลังความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาและสร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.4.2 ชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค สามารถประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 6 โวล์ทได้

1.4.3 วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุดผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคจากพลังความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1.5.1. ศึกษาทฤษฎีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริค

1.5.2. ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริค

1.5.3. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการสร้างและออกแบบชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.5.4. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการสร้างและออกแบบระบบการจัดและควบคุมชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.5.5. ออกแบบระบบในการสร้างและติดตั้งจริง

1.5.6. สร้างและติดตั้งระบบพร้อมทั้งทดสอบ

1.5.7. ทดสอบการจ่ายโหลดจริงและปรับปรุง

1.5.8. จัดทำรายงานการวิจัยและสรุปผล

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

1.6.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็คทริค

1.6.2. วิเคราะห์ประเมินผลการทำงานชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

1.6.3. การศึกษาใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาในเรื่องการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในวิเคราะห์การทำงานของชุดทดลองเทอร์โมอิเล็กทริค

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1. สามารถออกแบบชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคได้

1.7.2. สามารถสร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคได้

1.7.3. สามารถเข้าใจการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริคได้

1.7.4. ส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากความร้อนสูญเปล่า เพื่อการประหยัดพลังงานได้

1.7.5. สามารถเข้าใจหลักการกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริค

1.7.6. สามารถนำหลักการมาศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริค

1.7.7. สามารถประยุกต์ใช้หลักการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริคให้เหมาะสมกับแหล่งพลังงานประเภทอื่นได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทอร์โมอิเล็กทริคเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้าและสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริค ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ เรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริคได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงก็จะถ่ายเทไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านั้นคือมีอิเล็กตรอน (Electron) และ โฮล (Hole) เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้ไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างเครื่องทำความเย็นได้ การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริคได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ในสภาวะปัจจุบันแหล่งพลังงานต่าง ๆ เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก พลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล คือ ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์และน้ำมันดีเซล พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานจากชีวมวล ยังมีกำลังการผลิตที่น้อยมาก เป็นผลให้การผลิตไฟฟ้ามีราคาต้นทุนที่แพงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดโลก

จากการใช้พลังงานในปัจจุบันทำให้พลังงานเข้าสู่สภาวะขาดแคลน รวมทั้งสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันด้วย พลังงานทดแทนจากแหล่งต่างๆ ได้ถูกคิดค้นและนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานหลัก อย่างไรก็ดียังไม่สามารถที่จะนำมาใช้ทดแทนได้จริงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของพลังงานทดแทน ระบบปรับอากาศเป็นระบบที่มีอยู่แทบทุกที่ในประเทศไทยและเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากอีกทั้งยังสร้างความร้อนขึ้นด้วยในตัวระบบเอง จากความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นเราสามารถใช้พลังงานเหล่านั้นนำกลับมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ด้วยการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็คทริคเข้ามาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีขนาดเล็กกะทัดรัด

2.1 เทอร์โมอิเล็คทริค

2.1.1 เทอร์โมอิเล็คทริค

เทอร์โมอิเล็คทริคคือ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็คทริค ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ เรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็คทริคได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงก็จะถ่ายเทไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั้นคือมีอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้ไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างเครื่องทำความเย็นได้ การทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูล แบ่งเป็น 2 โหมดดังนี้ โหมดแรก เรียกว่า “โหมดผลิตไฟฟ้า (Generator mode)” โดยให้ความต่างของอุณหภูมิบนแผ่นเซรามิคด้านบนและล่าง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากพาหะเอ็นและพีในสารกึ่งตัวนำเหล่านั้น ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นอิเลคตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของพาหะข้างมากเหล่านั้น อิเลคตรอนจะไหลจากผิวด้านบนไปสู่ด้านล่าง ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีพาหะข้างมากเป็นโฮล (Hole) หรือประจุบวก เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง โฮลก็จะไหลจากผิวด้านบนไปด้านล่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นทิศทางของกระแสไฟฟ้าในเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูลจึงไหลตามกันไปในทิศเดียวกัน

การทำงานอีกโหมดหนึ่งในทางกลับกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่าง เรียกว่า “โหมดผลิตความเย็นด้วยไฟฟ้า (Refrigerator mode)” เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก เช่น แบตเตอรี จะทำให้เกิดความแตกต่างของความร้อนและความเย็นที่ผิวแต่ละด้าน เนื่องจากการกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการนำความร้อนจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง“เทอร์โมอิเล็คทริคโมดูล”ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แล้วในต่างประเทศที่มีอากาศหนาว เช่นโหมดการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถนำเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูลด้านหนึ่งมาประกบเข้ากับแหล่งความร้อนที่สูญเสียต่างๆ เช่น เครื่องจักร เครื่องยนต์ประเภทใช้ได้ทั้งไฟฟ้าและน้ำมัน (Hybrid) ท่อไอเสีย คอมเพรสเซอร์แอร์ เตาความร้อน หรือแม้แต่บนดาวเทียม ที่ผิวอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็คทริคโมดูลอากาศเย็นกว่า ก็จะเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งนี้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ส่วนโหมดผลิตเย็นด้วยไฟฟ้า

2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็คทริค

วัสดุเทอร์โมอิเล็คทริคแบ่งวัสดุออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่กลุ่มโลหะกับกลุ่มสารกึ่งตัวนำและฉนวน

2.1.2.1. กลุ่มโลหะ

ในโลหะที่มีเพียงสถานะใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level, EF) มีอิทธิพลต่อกระแสแล้วสัมประสิทธิ์ของซีเบคจะมีค่าต่ำมาก (A.F. Ioff, 1957) ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับโลหะแบบวาเลนซ์เดี่ยวที่ 300 K ประมาณได้เป็น

$$S \approx \pi^2 \frac{k_B}{e} \frac{k_B}{E_F} \approx 5\mu V K^{-1} \qquad (2.1)$$

ซึ่งทำให้เราได้ค่า $Z = \frac{S^2\sigma}{k} \approx 3\times10^{-6} K^{-1}$ ที่ 300 K จะเห็นได้ว่า Z มีค่าข้อนข้างต่ำ ดังนั้นโลหะจึงไม่ใช่วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาประดิษฐ์เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจากความร้อน

2.1.2.2. กลุ่มสารกึ่งตัวนำและฉนวน

สารกึ่งตัวนำและฉนวนสามารถมีค่าประสิทธิภาพของซีเบคสูงกว่าของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับเฟอร์มิวางอยู่ลึกลงไปภายในช่องว่างหวงห้าม (Forbidden gap) ทั้งนี้จะเห็นได้ชัดเจนโดยการทำให้ E*(EF/kBT = พลังงานเฟอร์มิแบบลดซึ่งวัดจากขอบของแถบการนำสำหรับอิเล็กตรอนหรือโฮล ในหน่วยของ k_BT) มีค่ามากขึ้นในสมการ

$$S = \frac{k_B}{q}\left[Q + E_F\right] \qquad (2.2)$$

โดยที่

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน = 1.66 x 10^{-19} C

Q คือ พลังงานความร้อนของการส่งผ่าน (J)

k_B คือ Boltzmunn's constant = 1.38 x 10^{-23} JK^{-1}

E_F คือ พลังงานเฟอร์มิ (eV)

ดังนั้น ค่าจำกัดของ S จะถูกจำกัดโดยค่าของช่องว่างของพลังงาน (energy gap) ในขณะที่ระดับเฟอร์มิในวัสดุชนิด N เข้าใกล้กึ่งกลางของช่องว่าง (วัสดุจะกลายเป็นแบบอินทรินสิคมากขึ้น)

การกระจายต่าง ๆ ต่อ จะถูกทำจากพาหะประจุต่างๆ ในแถบวาเลนซ์ ถ้ามีประจุทั้งของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้น สัมประสิทธิ์ของซีเบคที่ได้จะเท่ากับผลรวมของการกระจายความสัมพันธ์ S_N และ S_P นั่นคือ

$$S = \frac{S_N\sigma_N + S_P\sigma_P}{\sigma_N + \sigma_P} \qquad (2.3)$$

เมื่อ S = สัมประสิทธิ์ของซีเบครวม

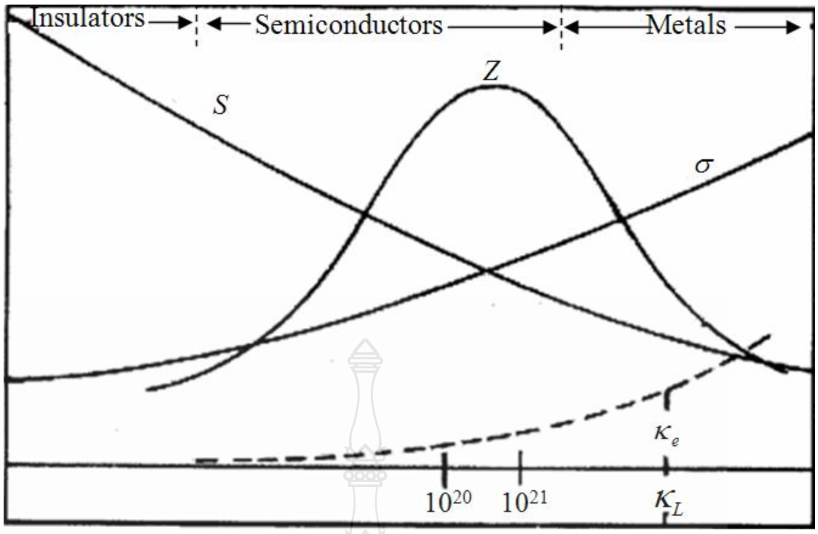
S_N = สัมประสิทธิ์ของซีเบคสาร n- type

S_P = สัมประสิทธิ์ของซีเบคสาร p- type

σ_N = สภาพนำไฟฟ้าของสาร n- type

σ_P = สภาพนำไฟฟ้าของสาร p- type

เนื่องจาก S_N และS_P มีเครื่องหมายตรงกันข้าม S จึงมีค่าต่ำ ขนาดของการลดลงของ S ขึ้นกับอัตราส่วนของสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของพาหะสัมประสิทธิ์ในแถบทั้งสอง ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบคที่สูงควรจะพบในวัสดุที่มีช่องว่างของพลังงานกว้างๆ เช่น วัสดุจำพวกฉนวนที่สามารถมีค่า E_F มากๆ และนำไปสู่การมีค่า S ในระดับ ~1 mV หรือสูงกว่าได้ อย่างไรก็ตามสภาพนำไฟฟ้าสำหรับฉนวนค่อนข้างต่ำ ปกติแล้วอยู่ในระดับ $10^{-12}\Omega^{-1}cm^{-1}$ หรืออาจต่ำกว่า ดังนั้น อาจทำให้ได้ค่า $S^2\sigma$ ที่ต่ำกว่าค่าที่พบ โดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำผลอันนี้จะสามารถเห็นได้โดยพิจารณาภาพที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นตารางที่เปรียบเทียบค่า Z สำหรับโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนที่อุณหภูมิ 300 K



ภาพที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของซีเบค α สภาพนำไฟฟ้า σ และสภาพนำความร้อนแบบแลซทิซ K_L และแบบอิเล็กโทรนิก K_e ที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของพาหะประจุอิสระ n [31]

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติการผันไฟฟ้าจากความร้อนของโลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน ที่ 300 K [32]

สมบัติ	หน่วย	โลหะ	สารกึ่งตัวนำ	ฉนวน
S	μVK^{-1}	□ 5	□ 200	□ 1×10^{3}
$\sigma = ne\mu$	$\Omega^{-1}cm^{-1}$	10^{6}	□ 10^{3}	□ 10^{-12}
$K = K_e + K_L$	–	□ λ_L	□ λ_L	□ λ_L
$\frac{K_e}{\sigma} = \frac{\pi^3}{3}\left(\frac{k_B}{e}\right)^2 T$	V^2K^{-1}	□ 7.3×10^{-6}	□ 4.4×10^{-6}	□ 4.4×10^{-6}
Z	K^{-1}	□ 3×10^{-6}	□ 2×10^{-3}	□ 5×10^{-17}

จากที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพของวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อน สามารถถูกประเมิน ค่าหรือเปรียบเทียบโดยพิจารณาจากค่า Figure of merit, $Z = \frac{S^2\sigma}{\lambda}$ โดยที่ค่า S , σ และ k เป็นค่าสมบัติพื้นฐานของวัสดุซึ่งขึ้นแก่กันและเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของตัวพาหะโดยทั่วไปแล้ว S และ σ เปลี่ยนแปลงในทางกลับกัน ซึ่งทำให้การเพิ่มขึ้นของกำลังตัวแปร (power factor) $S^2\sigma$ เป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามทฤษฎีดั้งเดิมหลายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำประเภทแถบกว้าง (broad band semiconductor) บอกเราได้ว่า สภาพเคลื่อนที่ของพาหะที่มีค่าสูงๆ สามารถทำให้ค่า S และ σ มีค่าสูงได้ (R.P. Chasmar and R.J. Stratton, 1959) จากผลอันนี้ทำให้แอลลอยด์กึ่งตัวนำและสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งมีสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะสูงถูกนำมาศึกษาอย่างกว้างขวางในฐานะที่เป็นวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อน ตัวอย่างของวัสดุเหล่านี้ได้แก่ Bi2Te3 , PbTe และแอลลอยด์ของ Si-Ge เป็นต้น

เมื่อคำนึงถึงการทำงานที่อุณหภูมิสูงในอากาศแล้วพบว่า ออกไซด์โลหะที่อยู่ในสถานะที่มีออกไซด์อยู่แล้วมีความได้เปรียบเนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีความเสถียรต่อความร้อนเป็นเลิศ นอกจากนี้แล้วยังมีวัสดุออกไซด์อีกหลายชนิดที่มีการรายงานว่ามีสภาพนำไฟฟ้าสูง มีความเสถียรทางความร้อนสูงและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ดังนั้นวัสดุกึ่งตัวนำออกไซด์โลหะ (metal oxide semiconductor) จึงควรนำมาศึกษาในแง่ของความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อนอุณหภูมิสูง (high temperature thermoelectric material) ต่อไป

ในปัจจุบันนี้วัสดุกึ่งตัวนำออกไซด์ เช่น (Zn1-xAlx)O2 , BaSrPbO3 , NaxCo2O4 , CaCo12O28 , Ca3Co4O9 , (ZnO)5In2O3 , NaxNix/2Ti1-x/2O2 , Cd3TeO6 , (Na,Li)NiO และอื่นๆ ได้ถูกศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อน ปัจจุบันมีทางเลือกใหม่อีกทางเลือกหนึ่ง คือกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็คตริก (Thermo Electric Generator TEG) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ใช้งานได้เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเครื่องยนต์กล่าวคือสามารถผลิตไฟฟ้าแบบเดียวกับที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันสามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในบ้านได้ทุกชนิด เช่น ไฟฟ้าแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ หรือกรณีช่วงที่เกิดวาตภัย อุทกภัย หรือภัยพิบัติอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี ข้อแตกต่างระหว่างเครื่องกำเนิดชนิดนี้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเครื่องยนต์ กล่าวคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โมอิเล็คทริคจะไม่มีเสียงรบกวนเนื่องจากเครื่องยนต์ ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ยกเว้น

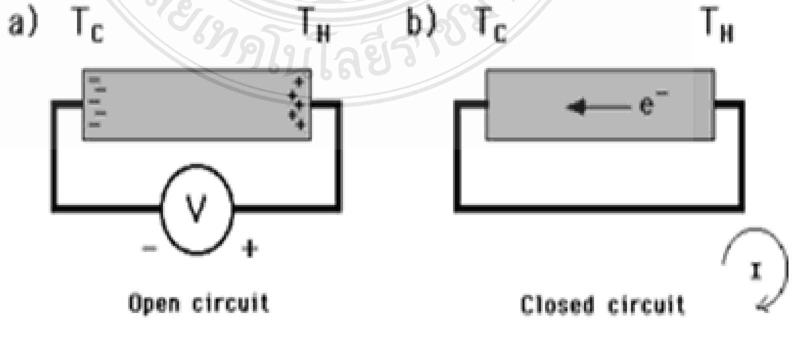
พัดลมระบายความร้อนตัวเล็กๆเท่านั้น ทำให้มีการสึกหรอต่ำ ค่าดูแลบำรุงรักษาต่ำ (เทคโนโลยีนี้ได้เริ่มพัฒนาโดย บริษัท 3M สำหรับโครงการอพอลโลขององค์การนาซ่า)เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ความร้อนที่เกิดจากหัวเผาแก๊ซจะถูกส่งไปยังเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลในทิศทางเดียวกันกับตัวทำความเย็น ซึ่งติดอยู่กับอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล ตัวทำความเย็นประกอบด้วยแผ่นครีบโลหะดูดความร้อนและพัดลมระบายความร้อนจากครีบโลหะออกสู่อากาศภายนอก

2.1.3 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็คทริค

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริค เป็นอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและอุณหภูมิ มีหลักการคือการผันความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หรืออาจผันไฟฟ้าไปเป็นความร้อนและความเย็น ซึ่งเป็นการนำเอาปลายของสารกึ่งตัวนำต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อกัน เมื่อจุดเชื่อมทั้งสองข้างถูกกระตุ้นด้วยความร้อนและความเย็น จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในระบบ พบว่าหากอุณหภูมิของจุดเชื่อมทั้งสองมีค่าแตกต่างกันมากเท่าไร อัตราการผลิตกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ปรากฏการณ์พื้นฐานทางการผันไฟฟ้าจากความร้อน มีอยู่ด้วยกันดังปรากฏการณ์ที่กล่าวมาแล้วคือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) และ ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ทั้งสามปรากฏการณ์นี้ มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หรืออาจผันไฟฟ้าไปเป็นความร้อน

2.1.3.1. ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ในปี 1821 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน กล่าวว่า “ เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ”



ภาพที่ 2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า [6]

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้าความสำคัญทางกายภาพของมันสามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุแต่ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิหนึ่งพาหะอิสระต่างๆที่ปลายด้านร้อน(Hot end)จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force หรือ back e.m.f) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลที่เกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck voltage) สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$\Delta V = \alpha \Delta T \qquad (2.4)$$

ซึ่งสมการ (2.4) สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและ gradient ของอุณหภูมิได้ว่า

$$E^{r} = \alpha \nabla T \qquad (2.5)$$

V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V

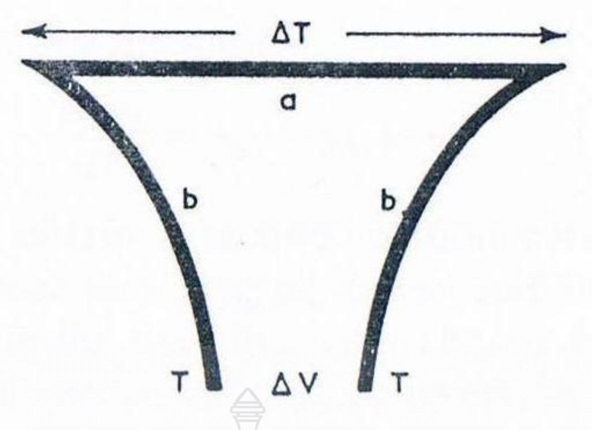
E^{r} = เวกเตอร์สนามไฟฟ้า, V/m

α = สัมประสิทธิ์ซีเบค, V/K

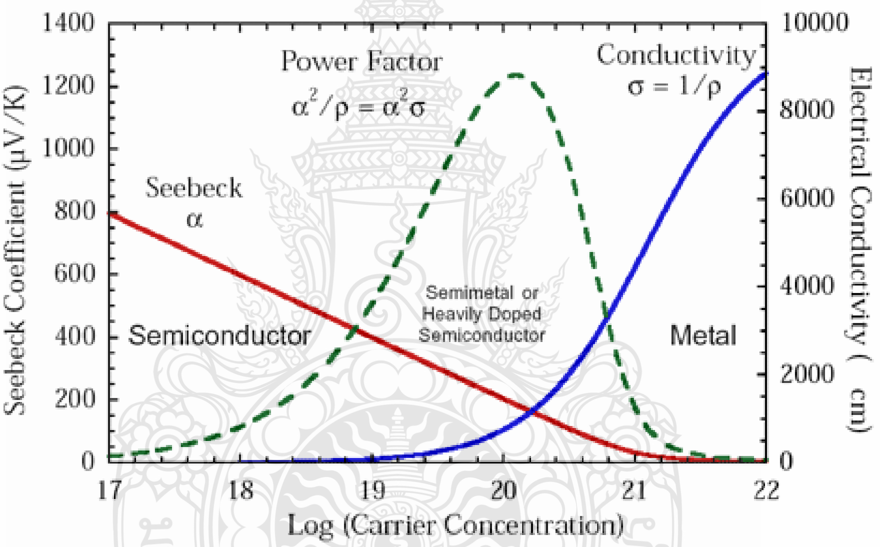
T = อุณหภูมิ , K

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุ thermoelectric และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ N-type จะมี seebeck coefficient เป็นลบ แต่ P-type จะมี seebeck coefficient เป็นบวก เป็นต้นสำหรับความแตกต่างกันของอุณหภูมิน้อย ๆ ความสัมพันธ์ข้างต้นจะเป็นแบบเชิงเส้นและนิยามสัมประสิทธิ์ซีเบค คือ α_{ab} สำหรับรอยต่อนั้น ดังนั้น สัมประสิทธิ์ของซีเบคของรอยต่อระหว่างสองวัสดุ a และ b เท่ากับความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์สมบูรณ์ของสองวัสดุนั้น

$$\alpha_{ab} = \alpha_{a} - \alpha_{b} \qquad (2.6)$$



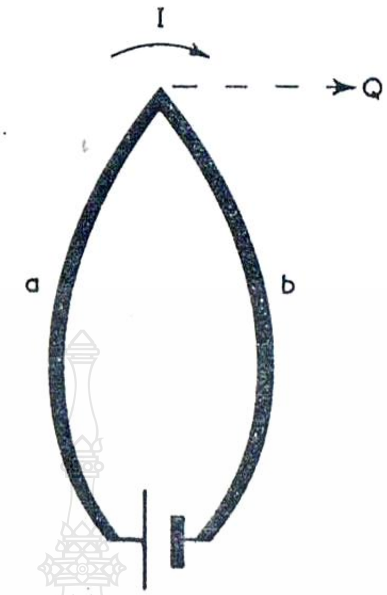
ภาพที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์ซีเบค [6]



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ power factor และ Seebeck coefficient [6]

2.1.3.2. ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect)

ในปี 1834 ยีน เพลทีเยอร์ ชาร์เลส อะธาเนส (Jean Charles Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส กล่าวว่า " เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า "



ภาพที่ 2.5 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ [6]

ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งคู่กันกับปรากฏการณ์ซีเบค และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำระบบหล่อเย็นจากการผันความร้อนจากไฟฟ้า (Thermoelectric refrigeration) ในที่นี้ อัตราของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (Rate of reversible heat absorption , Q) ซึ่งส่งมาพร้อมกับการผ่านกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านรอยต่อ คือ

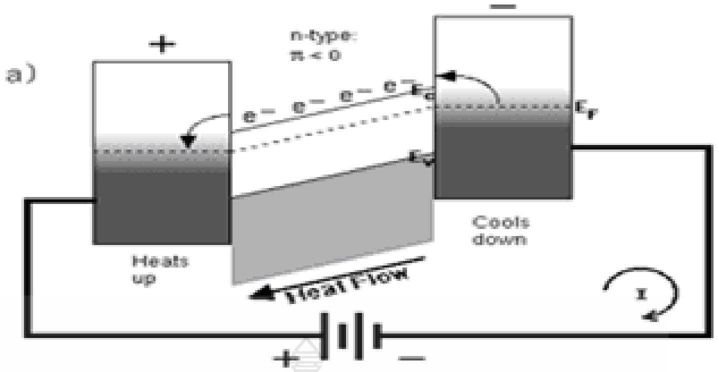
$$Q = \pi_{ab} I \tag{2.7}$$

โดยที่ คือ สัมประสิทธิ์ของเพลทีเยอร์ของรอยต่อ หาได้จาก

$$\pi = \alpha T \tag{2.8}$$

$\pi < 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเยอร์เป็นลบ

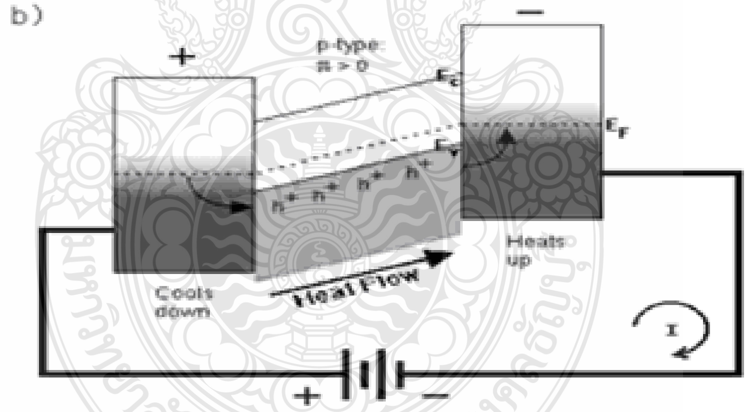
อิเล็กตรอนของอะตอมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากขวามาซ้าย การไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้ามีทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด N [6]

$\pi > 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเยร์เป็นบวก

หลุมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากซ้ายมาขวาการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.7

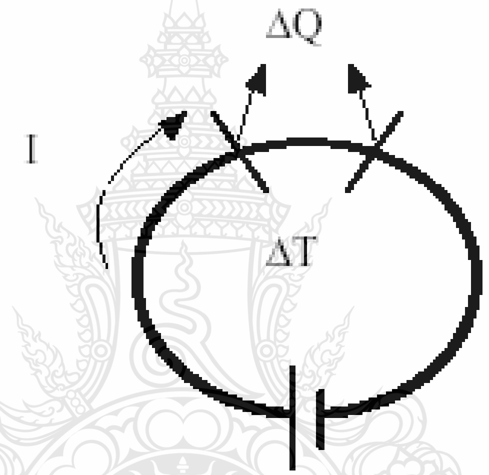


ภาพที่ 2.7 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด P [6]

2.1.3.3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ในปี 1954 วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือ หลอด เคลวิน (Lord Kelvin) นักฟิสิกส์ชาวสก๊อตกล่าวว่า " เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อนหรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น "

ปรากฏการณ์ทอมสัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ของความร้อนแบบกลับได้ Δ'_Q ซึ่งเกิดขึ้นมาเนื่องจากการผ่านของกระแสไฟฟ้าตามตัวนำเดี่ยวอันหนึ่งเมื่อมีเกรเดียนต์ ΔT อุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์ทอมสัน [30]

ความสัมพันธ์ระหว่าง α และ τ เป็น

$$\tau = T\frac{d\alpha}{dT} \tag{2.9}$$

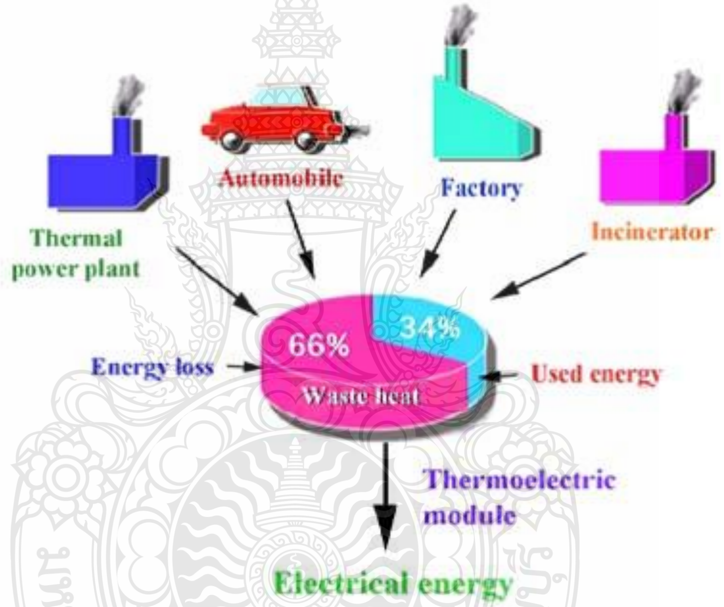
τ คือ thomson coefficient (VK-1)

2.1.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

2.1.4.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง

การเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ได้แก่เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวะมวลหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น ไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

และงานด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆเช่นการใช้ความร้อนสำหรับจักรกลไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การใช้ความร้อนเพื่อแปรรูปโลหะ การสันดาปเครื่องยนต์ การเผาขยะในระบบปิด และการทำความเย็นแบบ absorption เป็นต้น พบว่าประสิทธิภาพของการนำความร้อนจากแหล่งพลังงานดังกล่าวไปใช้ประโยชน์นั้นทำได้เพียง 30%-40% เท่านั้นความร้อนส่วนเกินต้องทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระบายความร้อนซึ่งต้องสูญเสียพลังงานไป 60%-70% เนื่องจาดข้อจำกัดของประสิทธิภาพคาร์โนต์ในการแปรผันพลังงานตามวัฏจักรคาร์โนต์เรียกความร้อนที่ไม่ก่อประโยชน์นี้ว่า ความร้อนเหลือทิ้ง กระบวนการแปรรูปพลังงานความร้อนและเกิดความร้อนเหลือทิ้งแสดงในรูปที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้ พลังงานแหล่งต่าง ๆ [28]

2.1.5 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

ความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งกำเนิดความร้อนขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมโลหะและโรงเผาขยะ นับเป็นแหล่งความร้อนเกรดสูง (high grade source) มีอุณหภูมิมากกว่า 650 °C ส่วนโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า และความร้อนจากปล่องไอเสียเครื่องยนต์ จะมี อุณหภูมิปานกลางประมาณ 120 °C – 650 °C ขณะที่ ความร้อนจากการหุงต้มหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ ใช้ไอน้ำแรงดันต่ำจะเป็นความร้อนเกรดต่ำ (low grade source) มีอุณหภูมิสูงในช่วง 60 °C – 120 °C

โดยประมาณ ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิ ของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ในตารางที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ซึ่งความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับมาคืนใช้ได้ แทนที่จะทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์ อีกประการหนึ่ง ลักษณะของความร้อนเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนต่อเนื่องและมีอุณหภูมิ ที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก จึงสามารถนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนเพื่อคืนกลับพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานไฟฟ้า อันจะช่วยให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 2.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง [33]

Type of device	Temperature,°C	Temperature,°F
Nickel refining furnace	1371 – 1649	2500 – 3000
Aluminum refining furnace	649 – 760	1200 – 1400
Zinc refining furnace	760 – 1093	1400 – 2000
Copper refining furnace	760 – 816	1400 – 1500
Steel heating furnace	927 – 1038	1700 – 1900
Glass melting furnace	982 – 1538	1800 – 2800
Solid waste incinerators	649 – 982	1200 – 1800

ตารางที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง [33]

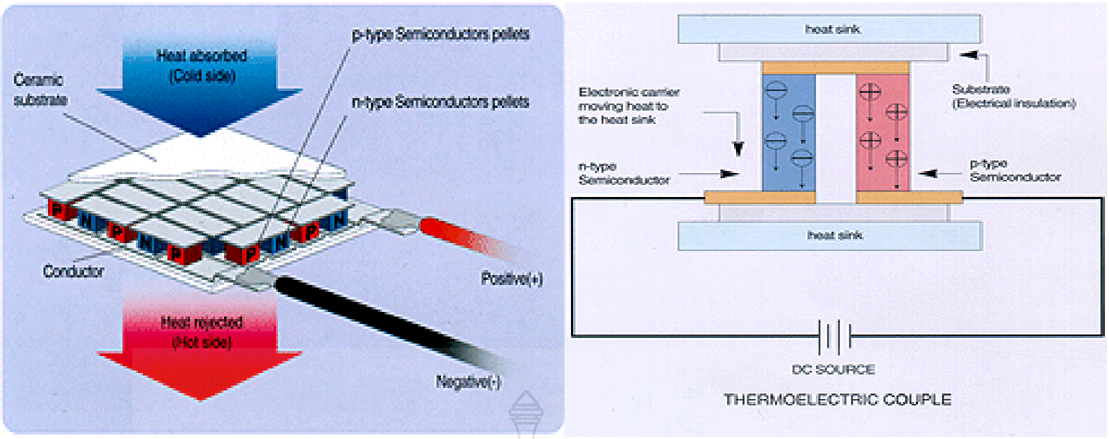
Type of device	Temperature,°C	Temperature,°F
Steam boiler exhausts	123 – 482	450 – 900
Gas turbine exhausts	371 – 538	700 – 1000
Reciprocating engine exhausts	316 – 593	600 – 1100
Heat treating furnace	427 – 649	800 – 1200
Drying and backing ovens	232 – 593	450 – 1100

ตารางที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ [33]

Type of device	Temperature,°C	Temperature,°F
Process staem condensate	54 - 88	130 – 190
Cooling water from : Furnace	32 – 55	90 – 130
Cooling water from : Bearing	32 – 88	90 – 190
Cooling water from : Welding machines	32 – 88	90 – 190
Cooling water from : Injection molding machines	32 – 88	90 – 190
Cooling water from : Air compressor	27 – 46	80 – 120
Cooling water from : Internal combustion engines	66 – 121	150 – 250
Air – cond. and refrig. Condensers	62 – 43	90 – 110

2.2.หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค

ในยุควิกฤตพลังงาน และสภาวะโลกร้อน การแสวงหาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ต่อการพัฒนาประเทศ เทคโนโลยีพลังงานทดแทนในประเทศไทย ก็มีอยู่หลายประเภท เช่น เซลล์สุริยะที่เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า แต่ก็มีเทคโนโลยีพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนความร้อนให้เป็นไฟฟ้าได้เช่นกัน นั่นก็คือ เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็คทริค โดยเซลล์เทอร์โมอิเล็คทริคประกอบไปด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็คทริคสองชนิด คือ ชนิด p และชนิด n ต่อกันเป็น ขั้ว p - n แบบอนุกรม มีหลักการทำงานอยู่สองลักษณะคือ เมื่อเซลล์เทอร์โมอิเล็คทริคได้รับความร้อนจะไปกระตุ้นให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนนั่นได้ไฟฟ้าออกมา เรียกว่าการผันความร้อนเป็นไฟฟ้า อีกลักษณะหนึ่งคือเมื่อเราให้กระแสไฟฟ้ากับเซลล์ทอร์โมอิเล็คทริค กระแสไฟฟ้าจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนนำความร้อนออกจากเซลล์ทำให้เกิดความเย็น เรียกว่า การผันไฟฟ้าเป็นความเย็น



ภาพที่ 2.10 การทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค [27]

เมื่อต่อกันครบวงจร ดังภาพที่ 2.10 P-type จะดูดอิเล็กตรอนเข้ามาทางขวาซึ่งมีอยู่ตรงรอยต่อ (Junction)ทำให้ด้านขวามือเป็นลบเมื่อโปรตอนจากความร้อนมากระทบ จะทำให้ประจุบวกลบ ซึ่งเป็นกลางแยกออกจากกัน เรียกว่า Hole-Pair ทำให้ประจุลบจากขวาวิ่งผ่านรอยต่อไป ทางซ้ายเป็นการเคลื่อนที่ของประจุลบ (ทวนเข็มนาฬิกา) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เคลื่อนที่ไปในทิศสวนกลับ คือ ตามเข็มนาฬิกา เทอร์โมอิเล็คทริคสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยสมการการถ่ายเทความร้อนที่ด้านเย็นหรือด้านร้อน เทอร์โมอิเล็คทริค จะสามารถที่จะผลิตไฟฟ้าได้โดยความแตกต่างของอุณหภูมิที่กระทบกับพื้นที่ของตัวเทอร์โมอิเล็คทริค จากนั้นอิเล็กตรอนจะแลกเปลี่ยนและเกิดกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จึงสามารถที่จะนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรือนำไปชาร์จแบตเตอรี่ได้ ระบบการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค จะผลิตไฟฟ้าได้ตามความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่แตกต่างกันของพื้นที่รับอุณหภูมิ ตามสมการที่ 2.10

$$Qc = n(\alpha ITc - 0.5I^2 R + Kt \Delta T) \quad (2.10)$$

โดยที่ Qc / Qh คือ ปริมาณความเย็นหรือความร้อนที่ให้กับเทอร์โมอิเล็คทริค (W)

α คือ สัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็น (K)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริค

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

Tc / Th คือ อุณหภูมิด้านเย็นหรือด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริค (K)

Kt คือ ค่าสภาพนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริค (Watt/cm-K)

n คือ จำนวนเทอร์โมอิเล็คทริคใน 1 โมดูล

และจะได้ค่ากำลังเอาท์พุตคือ

$$Pout = I^2 RL \tag{2.11}$$

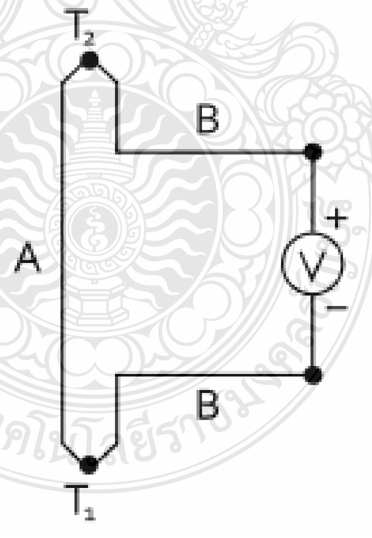
เมื่อ RL คือ ความต้านทานโหลดไฟฟ้าและจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุต คือ

$$V = \alpha\Delta T = (R+RL)I \tag{2.12}$$

$$I = \alpha\Delta T/ (R+RL) \tag{2.13}$$

$$Pout = RL(\alpha\Delta T)^2/(R+RL) \tag{2.14}$$

$$\eta = P / Q_h \tag{2.15}$$



ภาพที่ 2.11 วงจรการทำงานของเทอร์โมอิเล็คทริค [4]

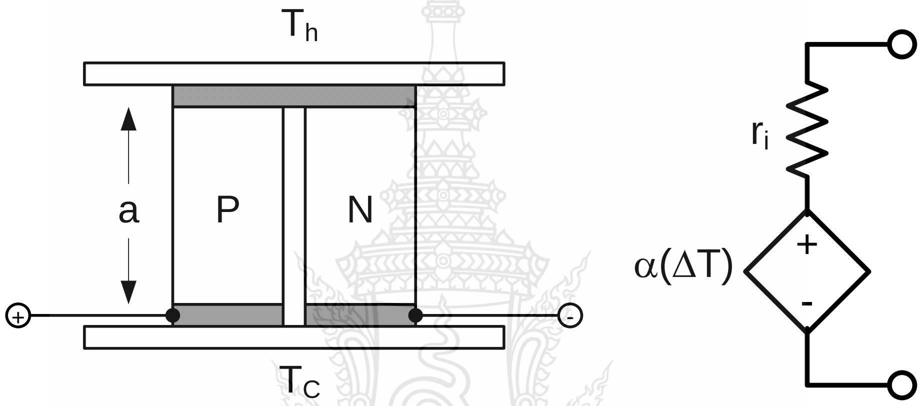
วงจรสมมูลย์ ภาพที่ 2.11 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิ T1 แตกต่างจาก T2 ก็จะทำให้เกิดแรงดันฟ้าได้

ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ (2.15)

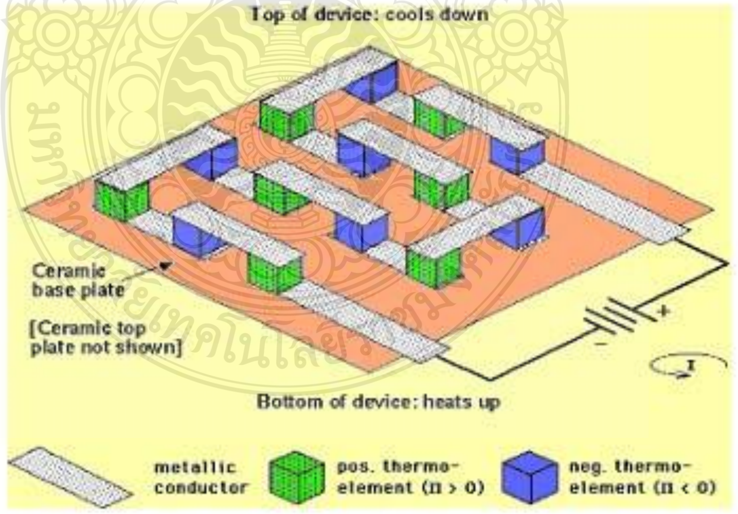
$$V = \int_{T_1}^{T_2} \left(S_\mathrm{B}(T) - S_\mathrm{A}(T) \right) dT. \tag{2.16}$$

ซึ่งจะส่งผมให้แรงดันที่เกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่แตกต่างนั่นเอง

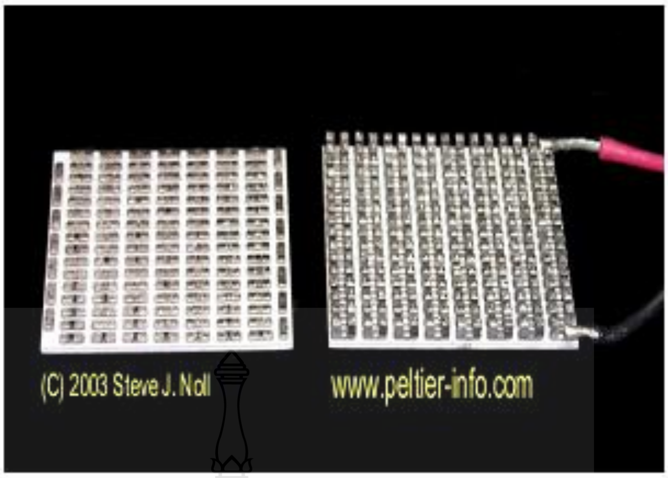
2.3.โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็คทริค



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็คทริคและวงจรทางไฟฟ้า [4]



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริค [8]



ภาพที่ 2.14 แผ่นฉนวนที่จัดเรียงเทอร์โมอิลิเมนต์ [8]

ภาพที่ 2.15 ภาพขยายส่วนฐานและเทอร์โมอิลิเมนต์ [8]

เทอร์โมอิเล็คทริคประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิดคือสาร N-Type และสาร P-Type ซึ่งต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าและต่อขนานกันทางความร้อน การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะเกิดขึ้น เมื่อป้อนพลังงานความร้อนเข้าที่ด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็คทริคและควบคุมอุณหภูมิอีกด้านหนึ่งไว้ที่ระดับต่ำกว่าโดยใช้ตัวระบายตัวระบายความร้อน ผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้ถ้ามีภาระทางไฟฟ้าต่ออยู่ภายนอกทำให้วงจรสมบูรณ์ แรงดันและกำลังงานที่เทอร์โมอิเล็คทริค

ผลิตได้นั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนที่ได้รับ ระบบระบายความร้อน และจำนวนของโมดูลที่นำมาต่อรวมกัน

เทอร์โมอิเล็คทริคสร้างพลังงานไฟฟ้าจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังรอยต่อ P-N กับผนังอีกด้านของสาร P,N ค่าแกรเดียนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างผนังทั้งสองด้านนี้กระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck) ผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของพาหะไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ P และ N ก่อตัวเป็นอำนาจสนามไฟฟ้าภายในที่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการ

$$v = \alpha(\nabla T) \tag{2.17}$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารกึ่งตัวนำ T คือฟังก์ชันอุณหภูมิระว่างผนังของเทอร์โมอิเล็คทริคและเมื่อพิจารณาถึงรายละเอียดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำทั้งสองขณะใช้งานพบว่า

$$v = -\left(\frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\alpha_n + \alpha_p}\right)\Delta T \tag{2.18}$$

และค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นตามสมการ

$$r_i = \frac{2a}{(\sigma_n + \sigma_p)}\left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_n}\frac{1}{\xi acth\,\xi a + 2\tau S a \xi^2}\right) \tag{2.19}$$

โดยที่ $\xi^{-1} = \sqrt{\frac{2\tau T_0}{e^2 n_0}\frac{\sigma_n \sigma_p}{(\sigma_n + \sigma_p)}}$ เป็น Diffusion ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ และ $\tau = \frac{1}{2\gamma_i n_0}$, โดยที่ γ_i คือ capture coefficient ในสารกึ่งตัวนำ n_0, p_0 คือปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารชนิดN,P α_n, α_p คือค่าสัมประสิทธิซีเบ็คในสาร N,P $\sigma_n = \rho_n \mu_n, \sigma_p = \rho_p \mu_p$ คือสภาพความนำไฟฟ้าของสารN,P ρ_n, ρ_p คือความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P μ_n, μ_p คือสภาพความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P และ S คือพื้นผิวที่เกิด Recombination ซึ่งในกรณีที่มีกระแสไหลมากๆ

แล้ว $(S \rightarrow \infty), (\tau \rightarrow 0)$ ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดรูปเป็น

$$r_i = \frac{2a}{\sigma_n + \sigma_p} \tag{2.20}$$

เทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลนอกจากผลิตไฟฟ้าแล้วยังสามารถทำให้เกิดอุณหภูมิร้อนและเย็นได้ โดยการป้อนไฟฟ้าเข้าไปยังเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล จะทำให้เกิดความร้อนด้านหนึ่งและความเย็นอีกด้านหนึ่ง อุณหภูมิความเย็นจะเย็นหรือร้อนอยู่ได้ในระยะเวลานานจะต้องมีอุปกรณ์ระบายความร้อนหรือ ระบายความเย็นให้แก่ด้านร้อนหรือด้านเย็น เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ระบายความร้อนหรือระบายความเย็น ที่เหมาะสมแล้ว ก็จะได้ความร้อนหรือความเย็นตามต้องการ

2.4. ประเภทของเทอร์โมอิเล็กทริค

เทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลสามารถแบ่งออกตามลักษณะได้ 2 แบบคือ

2.4.1. เทอร์โมอิเล็กทริคแบบชั้นเดียว (Single Stage Module) เป็นเทอร์โมอิเล็กทริคที่มีผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนกับด้านเย็นในการใช้งานไม่สูงมาก ซึ่งมีค่าประมาณ 67 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลต่างของอุณหภูมิขณะที่ไม่มีภาระความร้อน ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริคมีหลายรูปแบบทั้งขนาดและรูปร่าง อีกทั้งมีสมบัติหลายอย่างให้เลือกตามลักษณะการใช้งานเช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดัน และความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยสามารถสรุปลักษณะและสมบัติได้ดังนี้

- ขนาดพื้นที่ผิวหน้าเซรามิก 1.8 x 3.4 ตารางมิลลิเมตร ถึง 62 x 62 ตารางมิลลิเมตร
- ขนาดความสูงตั้งแต่ 2.54 มิลลิเมตร ถึง 5.8 มิลลิเมตร
- ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดตั้งแต่ 0.2 ถึง 125 วัตต์
- ค่ากระแสสูงสุดตั้งแต่ 0.8 ถึง 60 แอมป์
- ค่าแรงดันสูงสุดตั้งแต่ 0.4 ถึง 15.4 โวลต์

ภาพที่ 2.16 เทอร์โมอิเล็กทริคแบบชั้นเดียว (Single stage module) [8]

2.4.2. เทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้น (Multistage Module) เป็นเทอร์โมอิเล็กทริคที่มีการต่อตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป ลักษณะและสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้นที่สำคัญคือ

- พื้นที่ผิวด้านเย็นมีขนาดตั้งแต่ 3.2 x 3.2 ตารางมิลลิเมตร ถึง 62 x 62 ตารางมิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวด้านร้อนขนาดตั้งแต่ 3.8 x 3.8 ตารางมิลลิเมตร ถึง 62 x 62 ตารางมิลลิเมตร
- ขนาดความสูงตั้งแต่ 3.8 มิลลิเมตร ถึง 21.4 มิลลิเมตร
- ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดตั้งแต่ 0.39 ถึง 59 วัตต์
- ค่ากระแสสูงสุดตั้งแต่ 0.7 ถึง 9.5 แอมป์
- ค่าแรงดันสูงสุดตั้งแต่ 0.8 ถึง 14 โวลต์

ซึ่งจำนวนชั้นของเทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้น มีการเชื่อมต่อตั้งแต่ 2 ชั้น ถึง 6 ชั้น

ภาพที่ 2.17 เทอร์โมอิเล็กทริคแบบหลายชั้น (Multistage Module) [9]

2.5. ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจากความร้อน

เมื่อโหลดความต้านทาน R_L ถูกต่อไว้ระหว่างปลายด้านเย็นที่แขนของเทอร์โมคับเปิล a พลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปที่รอยต่อร้อนจะขับกระแสผ่านวงจรและส่งกำลังไปยัง R_L ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์

$$\eta = \frac{\text{กำลังที่ให้กับโหลด } R_L}{\text{ความร้อนดูดซับที่รอยต่อ}} \tag{2.21}$$

ถ้าสมมติให้สภาพนำไฟฟ้า สภาพนำความร้อนและสัมประสิทธิ์ของซีเบ็คของตัวนำ a และ b มีค่าคงที่และไม่คิดความต้านทานสัมผัสที่รอยต่อร้อนและเย็นแล้ว ประสิทธิภาพสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{\alpha I T_H + \lambda p (T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R} \tag{2.22}$$

โดยที่ λp คือ การนำความร้อนของ a และ b แบบขนาน และ R คือความต้านทานรวมของ a และ b ในวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อน σ, λ และ α จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.22 ยังสามารถใช้ได้ถ้าค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ที่พิจารณาในช่วงอุณหภูมิที่สนใจถูกนำมาพิจารณาด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความร้อนที่เราให้แก่ ด้านร้อน

$$Q = IT_h + K \Delta T - \frac{1}{2} RI^2 \tag{2.23}$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนที่ให้แก่ด้านร้อน (จูล)

α = สัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (โวลต์ต่อเคลวิน)

ΔT = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็น (องศาเคลวิน)

R = ความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริค (โอห์ม)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

T_h = อุณหภูมิด้านความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริค (องศาเคลวิน)

K = ค่าการนำความร้อนของ เทอร์โมอิเล็กทริค (วัตต์ต่อเซนติเมตรเคลวิน)

เราได้ กำลังไฟฟ้าจ่าย ออกมาคือ

$$P_{out} = I^2 R_L \tag{2.24}$$

เมื่อ R_L = ค่าความต้านทานของโหลดทางไฟฟ้า

ค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งาน จะออกมาในรูป Seebeck effect คือ

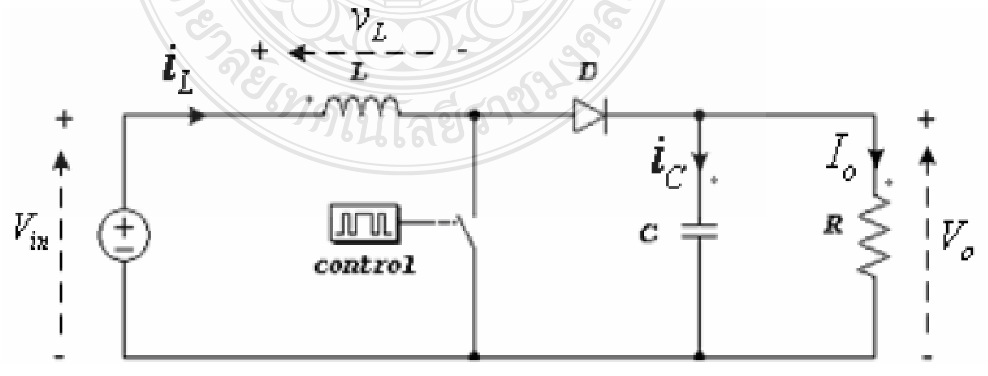
$$V = \alpha \Delta T = (R + R_L) I \tag{2.25}$$

$$\therefore I = \frac{\alpha \Delta T}{R + R_L} \tag{2.26}$$

$$\therefore P_{out} = R_L \frac{(\alpha \Delta T)^2}{(R + R_L)} \tag{2.27}$$

2.6 วงจรทบระดับแรงดัน

วงจรทบระดับแรงดันไฟตรง หรือวงจร Boost Converter เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระเพื่อมจากสัญญาณควบคุม จึงนิยมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass Filter) แบบวงจร Pure C ขนานทางด้านขาออก เพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไฟตรงมากๆ ลักษณะวงจรทบระดับแรงดันเป็นดังรูป อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้เชิงปฏิบัติในวงจรถูกแทนด้วยสวิตซ์ควบคุมเชิงอุดมคติดังรูป



ภาพที่ 2.18 วงจรทบระดับแรงดัน [25]

2.6.1 เงื่อนไขในการทำงานของวงจรทบระดับแรงดัน

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันในสภาวะอยู่ตัว จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานเสียก่อน เช่นเดียวกับในวงจรทอนระดับแรงดัน

2.6.1.1.รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะค่าเท่ากันและเป็นบวกเสมอ

2.6.1.2.ค่าแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ผลรวมค่าผลคูณของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-second) เป็นศูนย์

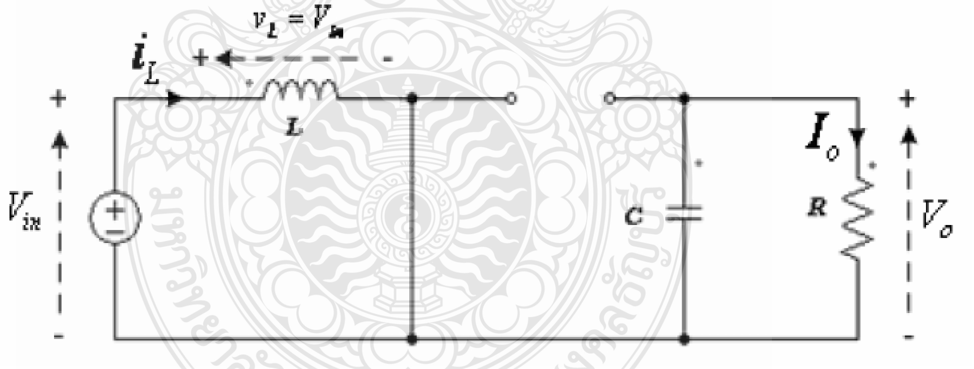
2.6.1.3. ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์

2.6.1.4. กำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก (พิจารณาวงจรทำงานแบบอุดมคติ)

2.6.2 หลักการทำงานของวงจรทบระดับแรงดัน

การทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 จังหวะคือ ขณะสวิตซ์นำกระแสและไม่นำกระแส

2.6.2.1 ขณะสวิตซ์นำกระแส



ภาพที่ 2.19 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันขณะสวิตซ์นำกระแส [25]

ขณะสวิตซ์นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายจะไหลวนผ่านตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในภาพที่ 2.22 ในขณะเดียวกันไดโอดจะได้รับการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) กระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านได้ ทำให้สมการของวงจรเป็นดังนี้

$$V_{in} + v_L = 0 \quad (2.27)$$

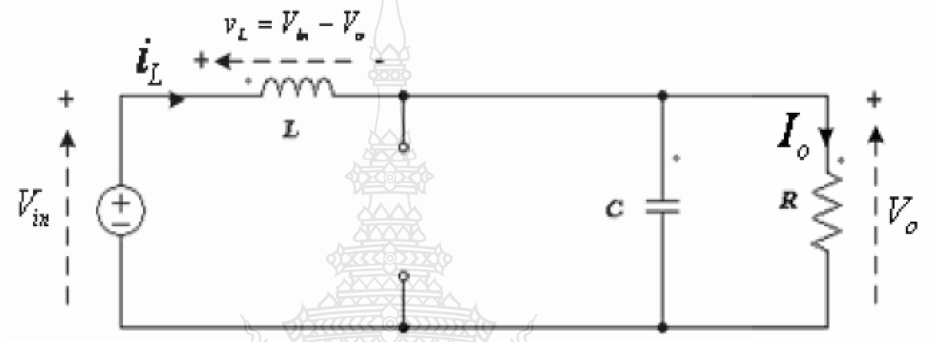
$$v_L = V_{in} = L\frac{di_L}{dt} \quad (2.28)$$

$$\frac{v_{in}}{L} = \frac{di_L}{dt} \tag{2.29}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{v_{in}}{L} \tag{2.30}$$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_{in}}{L}\right) DT \tag{2.31}$$

2.6.2.2 ขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส



ภาพที่ 2.20 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส [25]

ขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยทันทีทันใดไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward Bias) ให้นำกระแส เป็นผลทำให้กระแสสามารถไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะได้สมการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

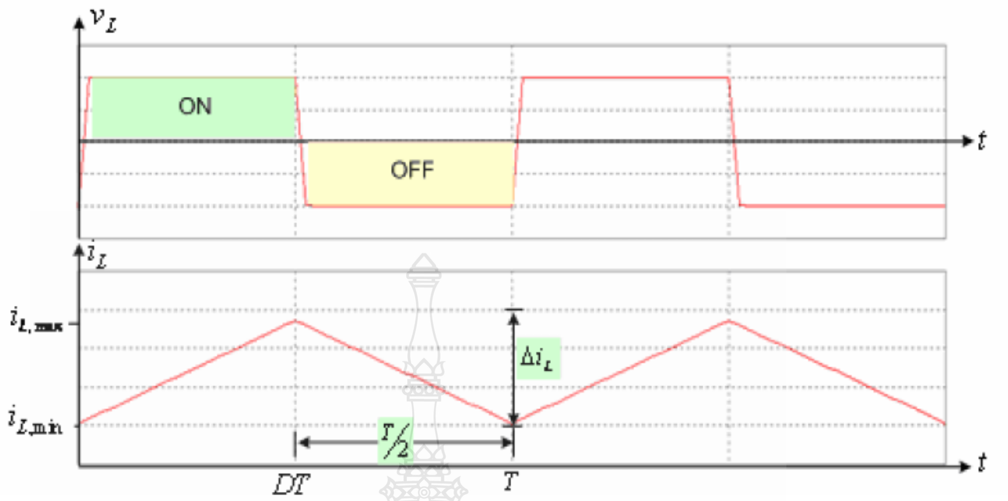
$$-V_{in} + v_L + V_o = 0 \tag{2.32}$$

$$v_L = (V_{in} - V_o) = L\frac{di_L}{dt} \tag{2.33}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_{in} - V_o)}{L} \tag{2.34}$$

ในขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแหลงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และการลดลงของกระแสจะเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปทั้งนี้สมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตซ์หยุดนำกระแสจะเป็นดังนี้

$$\Delta i_{L,off} = \frac{(V_{in} - V_o)}{L} \cdot (1 - D)T \tag{2.35}$$



ภาพที่ 2.21 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรทบระดับแรงดัน [25]

2.6.3 การคำนวณค่าในวงจรทบระดับแรงดัน

ในวงจรทบระดับสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ในขณะสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ได้

2.6.3.1 ค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร

อัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันสามารถคำนวณหาได้จากเงื่อนไขข้อที่หนึ่ง ซึ่งกำหนดว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลา จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\Delta i_L,_{on} + \Delta i_L,_{off} = 0 \tag{2.36}$$

$$\left(\frac{V_{in}}{L}\right)DT + \left\{\frac{(V_{in}-V_o)}{L}\cdot(1-D)T\right\} = 0 \tag{2.37}$$

$$(V_{in})D + (V_{in}-V_o)\cdot(1-D) = 0 \tag{2.38}$$

$$V_{in} - V_o(1-D) = 0 \tag{2.39}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \tag{2.40}$$

$$v_{L,av} = \left(v_{L,on}\right)\left(t_{on}\right) + \left(v_{L,off}\right)\left(t_{off}\right) = 0 \tag{2.41}$$

$$V_{in}\left(t_{on}\right) + (V_{in} - V_o)\left(t_{off}\right) = 0 \tag{2.42}$$

$$t_{on} = DT, t_{off} = (1-D)T \tag{2.43}$$

$$\left(V_{in}DT\right) + (V_{in} - V_o)(1-D)T = 0 \tag{2.44}$$

$$V_{in}DT + V_{in} - V_o - V_{in}DT + V_oDT = 0 \tag{2.45}$$

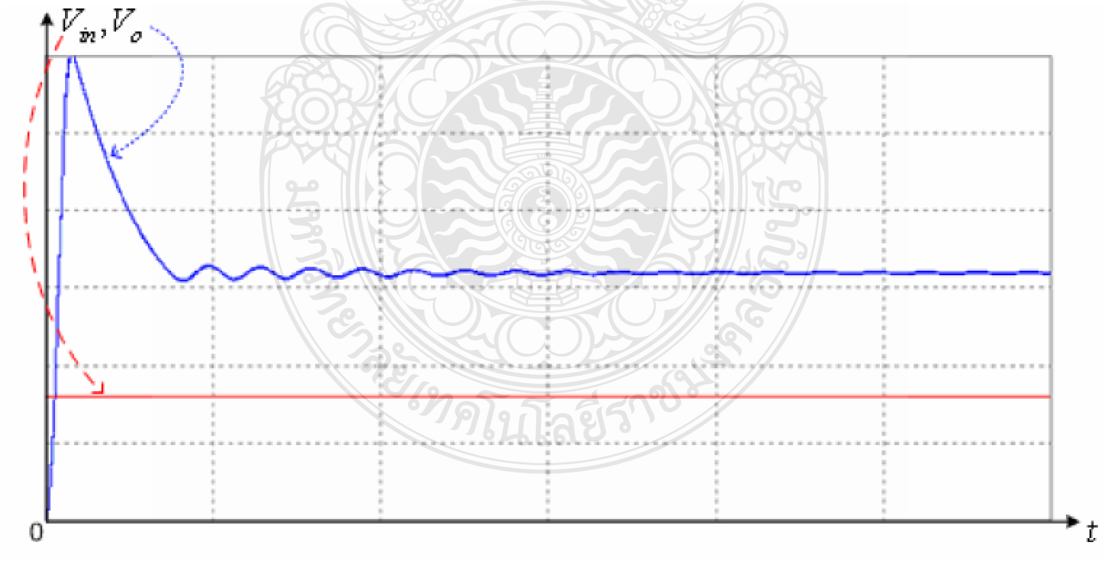
$$V_{in}DT - V_o(1-DT) = 0 \tag{2.46}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \tag{2.47}$$

$v_{L,av}$ เป็นแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

$v_{L,on}$ เป็นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตซ์นำกระแส

$v_{L,off}$ เป็นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตซ์หยุดนำกระแส

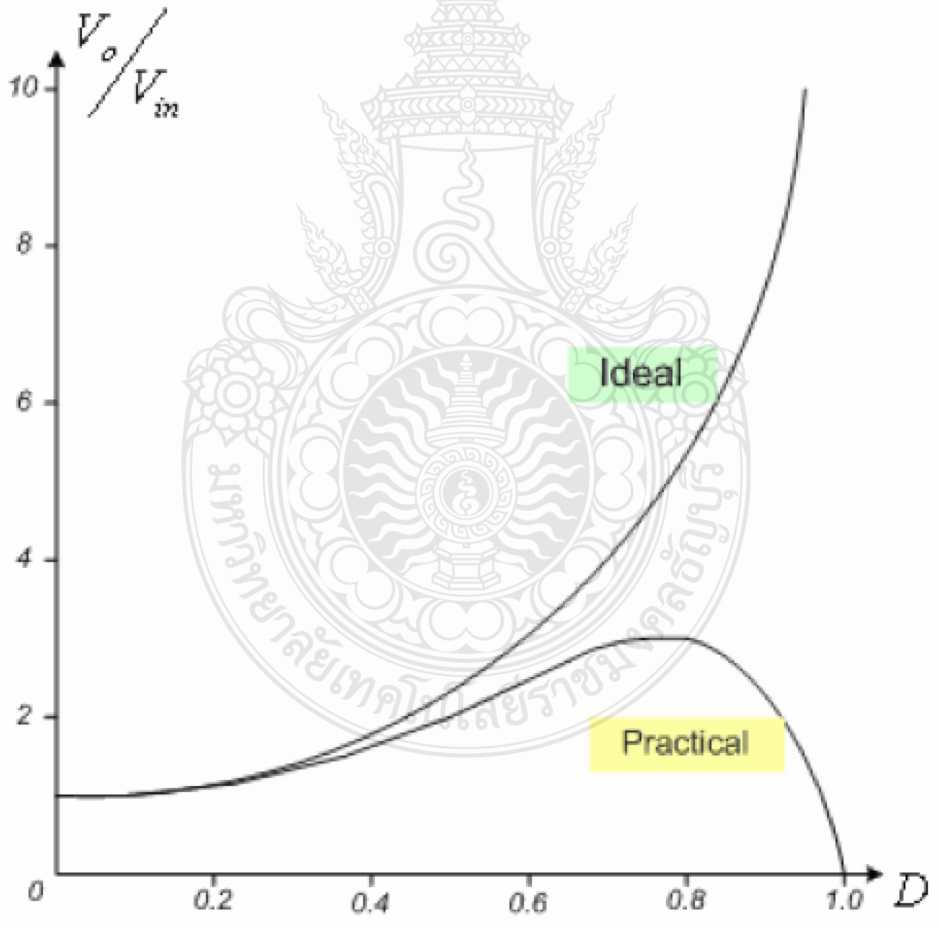


ภาพที่2.22 รูปคลื่นแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อ 0.5 [25]

ในภาพที่ 2.25 แสดงค่าแรงดันขาเข้าและขาออกของวงจรขณะกำหนดให้ค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.5 (หรือ) ซึ่งแรงดันขาออกขณะอยู่ตัวของวงจรจะเป็น 200% ของขนาดแรงดันขาเข้า 0.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายแรงดันกับ Duty Cycle ของวงจรแสดงดังตาราง จะเห็นว่า ในเชิงอุดมคติอัตราขยายสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้จนถึงค่าอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติ แรงดันขาออกไม่สามารถมีค่าสูงขึ้นได้มากเท่าทางอุดมคติ เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละส่วนของวงจร

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันที่ค่า Duty Cycle ต่างๆ [25]

ค่า Duty Cyele	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ค่าอัตราขยายแรงดัน	1.00	1.10	1.25	1.43	1.67	2.00	2.50	3.33	5.00	10.00	∞



ภาพที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า Duty Cycle ของวงจรทบระดับแรงดัน [25]

2.6.3.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดสำหรับวงจรทบระดับแรงดัน

แรงดัน กระแสขาออกและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับแรงดันควรอยู่ในโหมดต่อเนื่อง การคำนวณหาขนาดหาค่าที่เล็กที่สุดของตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จะเริ่มที่การคำนวณค่ากระแสเฉลี่ยไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะวิกฤติ ซึ่ง ,min0LI=

จากสมมติฐาน วงจรมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$P_{in} = P_o = \frac{V_o^2}{R} \tag{2.48}$$

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} = V_{in} \cdot I_L \tag{2.49}$$

$$V_{in}.I_L = \frac{V_o^2}{R} \tag{2.50}$$

$$V_{in} \cdot I_L = \frac{\left(\frac{V_{in}}{1-D}\right)^2}{R} \tag{2.51}$$

$$I_L = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} \tag{2.52}$$

ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการ

$$I_{L,\max} = \left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{V_{in}DT}{L}\right) \tag{2.53}$$

$$I_{L,\min} = \left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{V_{in}DT}{L}\right) \tag{2.54}$$

ดังนั้นค่ากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด ขณะสภาวะวิกฤติ

$$I_{L,\min} = \left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{V_{in}DT}{L}\right) = 0 \tag{2.55}$$

$$\left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{V_{in}DT}{L}\right) \tag{2.56}$$

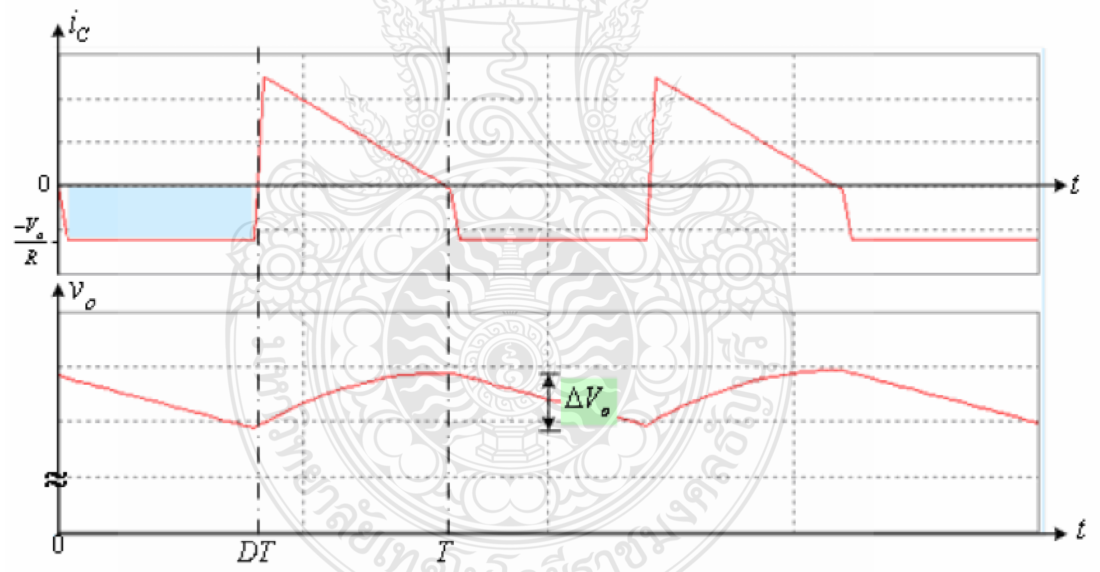
$$L_{\min} = \left(\frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \right) \tag{2.57}$$

$$f = \left(\frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot L_{\min}} \right) \tag{2.58}$$

ค่าความเหนี่ยวนำเล็กที่สุดทำได้โดยการปรับค่า Duty Cycle ความต้านทานโหลด หรือความถี่สวิตซ์

2.6.3.3 อัตราระลอกคลื่น (Ripple Factor) ของแรงดันขาออก

รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรแสดงรูปที่ 2.27 ซึ่งจะเห็นว่าการกระเพื่อมของแรงดันขาออกสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 2.24 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรทบระดับแรงดัน [25]

ในทางปฏิบัติจะไม่นิยมใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ขนาดของตัวเก็บประจุซึ่งสัมพันธ์กับค่าระลอกคลื่นแรงดันขาออกนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

จาก $\Delta Q = C \cdot \Delta V_o = I_o \cdot t_{on}$

ดังนั้น $\Delta V_o = \dfrac{I_o \cdot t_{on}}{C} = \dfrac{V_o DT}{RC}$

จะได้ $\dfrac{\Delta V_o}{V_o} = \dfrac{DT}{RC} = \dfrac{D}{RC \cdot f}$

เมื่อ $i_o = \dfrac{V_o}{R}$ และ $t_{on} = DT$

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันจะมีค่าน้อยลง ถ้าวงจรมีค่า Duty Cycle เข้าใกล้ค่าศูนย์ หรือโดยการเพิ่มค่าความต้านทานโหลด หรือเลือกใช้ค่าความถี่สวิตซ์ f สูงๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐ จันท์ครบ ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน อมร สมเจตน์เลิศเจริญ และเจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ [1] นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริคโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้ม โดยทำการติดตั้งเทอร์โมอิเล็คทริคบนตัวรับความร้อนที่ทำจากฮีตซิงค์สองอันที่หันหน้าเข้าหากัน และใช้ครีบเป็นตัวรับความร้อนทำให้มีพื้นที่รับความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่อีกด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็คทริคมีตัวระบายความร้อนติดตั้งอยู่ ทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าด้วยการประกอบอาหารจากเตาหุงต้มประจำวัน เช้า – เย็น โดยได้มีการทอสอบหาตำแหน่งในการติดตั้งตัวเทอร์โมอิเล็กทริคให้เหมาะสมและทดสอบประจุไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่โดยใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน เช่น ถ่าน ไม้ฟืน กะลามะพร้าว

เจริญพร เลิศสถิตธนกร,ณัฐวุฒิ สุวรรณทา [2] นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของตะเกียงโดยใช้เทอร์โมอิเล็คทริคยึดติดกับส่วนบนของฝาครอบตะเกียงซึ่งใช้วัสดุที่ทำจากสแตนเลส ส่วนด้านเย็นยึดติดกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบสี่เหลี่ยมผืนผ้าผลิตจากอลูมิเนียมการปรับเปลี่ยนความร้อนที่ให้กับเทอร์โมอิเล็กทริคทำได้โดยการปรับวาล์วปรับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

นพพร พัชรประกิติ*, ยุทธสิทธิ์ แสนเรือน และพันธ์ชัย กาวิชัย [3] นำเสนอการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสด้วยอุปกรณ์ทำความเย็นเพลเทียร์หรือเทอร์โมอิเล็คทริคตามปรากฏการณ์ซีเบค ซึ่งได้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็คทริคจะถูกนำไปปรับระดับแรงดันด้วยวงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งการปรับระดับแรงดันควบคุมทำได้ด้วยเทคนิคมอดูเลทความกว้างพัลส์ (PWM) ที่ความถี่ 2-20 กิโลเฮิร์ต เพื่อทำการควบคุมจังหวะการปิด-เปิดของสวิตซ์ และพลังงานที่ปรับแรงดันแล้วจะนำไปอัดประจุแบตเตอรี่ด้วย

หลักการอัดประจุแบบแรงดันคงที่จากทดสอบวงจรโดยใช้ แผงเทอร์โมอิเล็กทริคขนาด 12 โวลต์ 12 ตัวกับแหล่งความร้อนสองชนิด คือชนิดโหลดความร้อนคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส (ผลต่างอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส) กำลังไฟฟ้าที่ได้ 2.1 วัตต์ และชนิดโหลดความร้อนฮีตเตอร์ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (ผลต่างอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) กำลังไฟฟ้าที่ได้ 4.05 วัตต์ ซึ่งโหลดความร้อนทั้งสองชนิดสามารถนำไปอัดประจุแบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ ได้

ณัฐ จันท์ครบ,เสรี ชื่นอารมณ์,เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ [4] นำเสนอผลการวิเคราะห์รูปแบบการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพโดยการนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่คุณสมบัติใกล้เคียงกันกับแตกต่างกันมาต่อร่วมกันในลักษณะขนานกับอนุกรม ผลการทดลองพบว่าการต่ออนุกรมจะให้อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อโหลดต่ำกว่าแบบขนาน ขณะที่แบบขนานจะให้กำลังไฟฟ้าดีที่สุดสูงกว่าแบบอนุกรม การต่ออนุกรมจึงเหมาะกับการใช้งานที่ปราศจากวงจรแปลงผันไฟฟ้า ส่วนแบบขนานเหมาะสมกับการใช้งานที่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ และเมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลมากขึ้น เปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการต่อใช้งานแบบขนานจะสูงกว่าการต่อแบบอนุกรมประมาณ 3 เท่า โดยการต่อแบบขนานจะให้เปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าจริงลดลง 3.44% ส่วนการต่ออนุกรมทำให้เปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าจริงลดลง 10.69% ต่อการเพิ่ม 1 โมดูล

Eakburanawat, J. and Boonyaroonate, I., [5]นำเสนอผลการวิเคราะห์รูปแบบการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็คทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพโดยการนำโมดูลเทอร์โมอิเล็คทริคที่คุณสมบัติใกล้เคียงกันกับแตกต่างกันมาต่อร่วมกันในลักษณะขนานกับอนุกรม เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการต่อใช้งานและการนำไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคสูงสุด

เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ [6] นำเสนอผลการจำลองการทำงานและออกแบบสร้างระบบประจุแบตเตอรี่แบบใช้พลังงานจากความร้อนทิ้ง โดยระบบจะเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนทิ้งเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อประจุลงในแบตเตอรี่ ระบบที่นำเสนอประกอบด้วยตัวเทอร์โมอิเล็กทริคที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรแปลงผันไฟตรงแบบ SEPIC เป็นที่ใช้เป็นตัวควบคุมการประจุ โดยได้มีการทดสอบหาคุณลักษณะของตัวเทอร์โมอิเล็กทริคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ และจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม Orcad PSpice พร้อมทั้งสร้างเครื่องต้นแบบและทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบ จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

นี้ก็คือ เพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวเทอร์โมอิเล็กทริค และประยุกต์ใช้งานให้เป็นเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่สามารถใช้พลังงานจากความร้อนทิ้ง หรือแหล่งพลังงานความร้อนอื่นๆ ได้โดยตรง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulik และ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในการสร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคสามารถประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ เพื่อใช้ในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าต่อไป

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของการทดสอบในสภาพจริงกับการทดสอบด้วยแบบจำลอง ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค การเชื่อมต่อกันในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค และรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของชุดโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulink

ขั้นตอนที่ 2 รวบรวมข้อมูลการสร้างและออกแบบระบบการจัดและควบคุมชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค ทดสอบการทำงานในสภาพจริงโดยการนำเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล TEG 12750 D ทำการทดสอบหากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้,ทดสอบคุณสมบัติการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลและทดสอบการเชื่อมต่อกันในการผลิตไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 3 นำผลการทดสอบในสภาพจริงและข้อมูลของชุดโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจากผู้ผลิต,สมการทางคณิตศาสตร์และนำค่าต่างๆเหล่านี้มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

โปรแกรม MATLAB SIMULINK สร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค สามารถประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 6 โวลต์

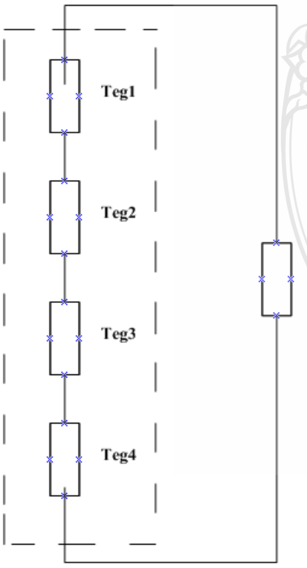
ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดสอบแบบจำลองและบันทึกผลการทดสอบแบบจำลอง ปรับปรุงแก้ไขชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 6 โวลต์

ขั้นตอนที่ 5 นำผลการทดสอบกับแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในสภาพจริง แล้วอธิบายข้อแตกต่างและผลจากการเปรียบเทียบ

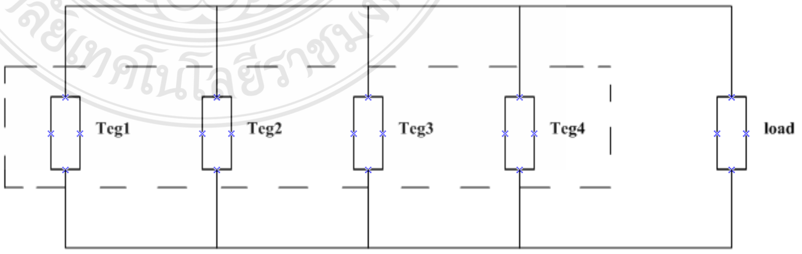
ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลจากกงานวิจัยเล่มนี้

3.2 การทดลองคุณสมบัติการต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆ โมดูลให้ทำงานร่วมกันสามารถทำได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบอนุกรม การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบขนาน และการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบผสม จากความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ทำให้การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในแต่ละแบบให้ประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลที่นำมาเชื่อมต่อกัน

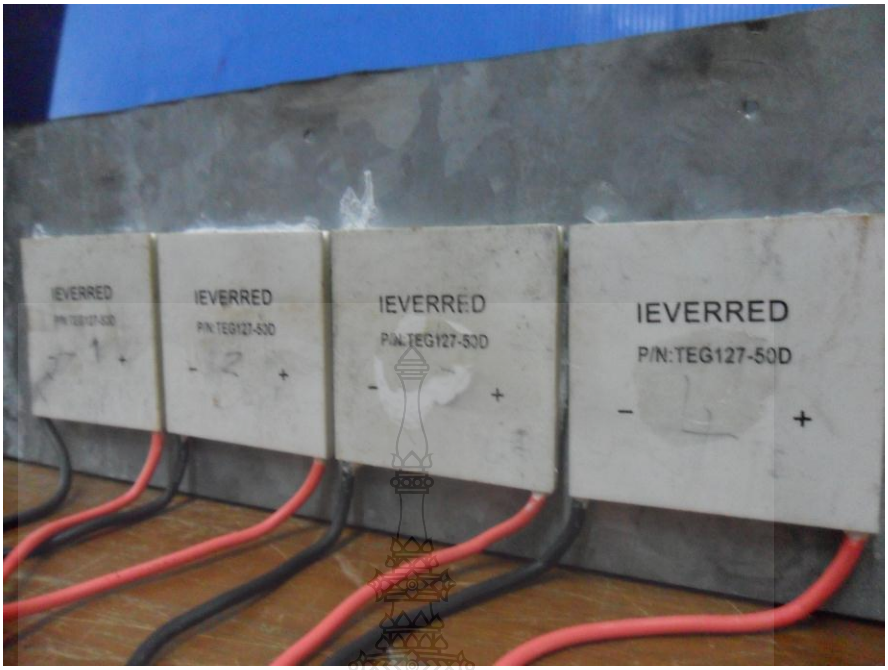


(ก) การต่อโมดูลแบบอนุกรม



(ข) การต่อโมดูลแบบขนาน

ภาพที่ 3.1 วงจรการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค



ภาพที่ 3.2 การติดตั้งชุดเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล

ภาพที่ 3.3 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อน จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริคจำนวน 4 โมดูล ประกอบอยู่บนโครงสร้างระบบเดียวกัน โดยยึดติดผนังด้านร้อนของระบบด้วย ฮีทเตอร์ ขนาด 1000 วัตต์ และผนังด้านเย็นของระบบระบายความร้อนออกด้วยน้ำเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศจะทำการทดสอบคุณสมบัติความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล และทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ทั้งในลักษณะการขนานและการอนุกรม โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.3 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ในโปรแกรม Matlab Simulik เพื่อใช้วิเคราะห์การทำงานเปรียบเทียบกับชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้า สมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ จากสมการที่ 2.4 นำมาเขียนสมการจำลองการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคดังสมการ 3.1

$$\Delta v = \alpha(\nabla T) \tag{3.1}$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารกึ่งตัวนำ T คือฟังก์ชันอุณหภูมิระว่างผนังของเทอร์โมอิเล็กทริค และเมื่อพิจารณาถึงรายละเอียดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำทั้งสองขณะใช้งาน[2] พบว่า

$$v = -\left(\frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\alpha_n + \alpha_p}\right)\Delta T \tag{3.2}$$

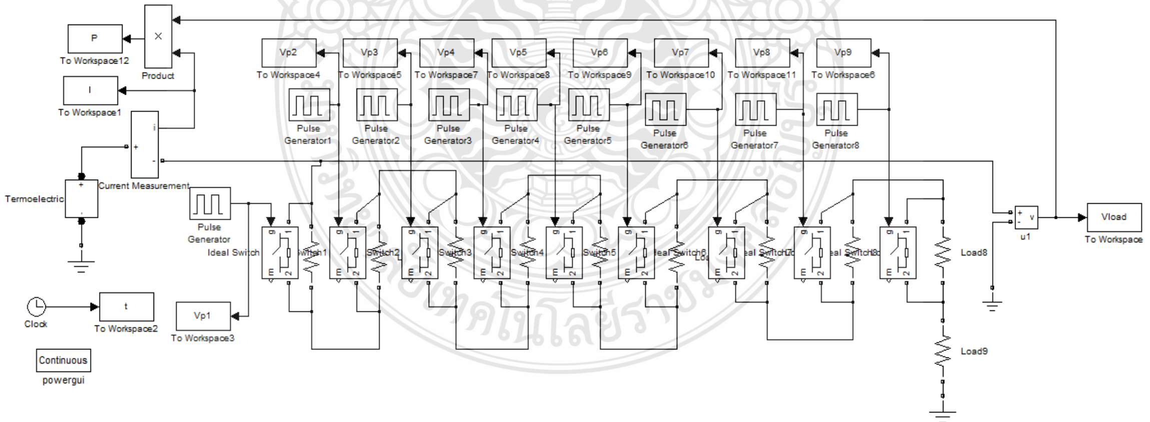
และค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นตามสมการ

$$r_i = \frac{2a}{(\sigma_n + \sigma_p)}\left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_n}\frac{1}{\xi acth\,\xi a + 2\tau Sa\xi^2}\right) \tag{3.3}$$

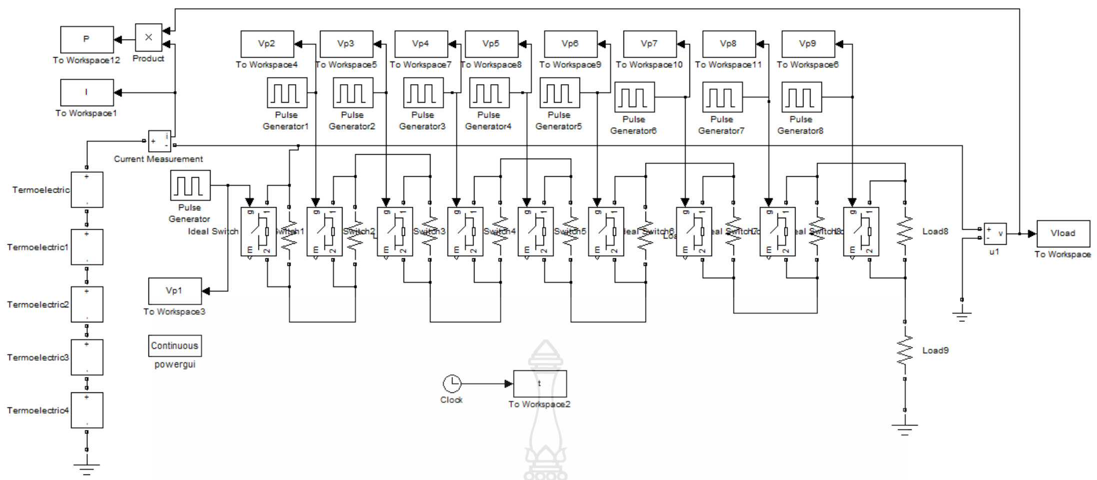
โดยที่ $\xi^{-1} = \sqrt{\frac{2\tau T_0}{e^2 n_0}\frac{\sigma_n \sigma_p}{(\sigma_n + \sigma_p)}}$ เป็น Diffusion ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ และ $\tau = \frac{1}{2\gamma_i n_0}$, โดยที่ γ_i คือ capture coefficient ในสารกึ่งตัวนำ n_0, p_0 คือ ปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารชนิด N,P α_n, α_p คือค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารN,P $\sigma_n = \rho_n \mu_n, \sigma_p = \rho_p \mu_p$ คือสภาพความนำไฟฟ้าของสาร N,P ρ_n, ρ_p คือความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P μ_n, μ_p คือสภาพความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P และ S คือพื้นผิวที่เกิด Recombination ซึ่งในกรณีที่มีกระแสไหลมากๆ แล้ว $(S \to \infty), (\tau \to 0)$ ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดรูปเป็นดังสมการ

$$r_i = \frac{2a}{\sigma_n + \sigma_p} \tag{3.4}$$

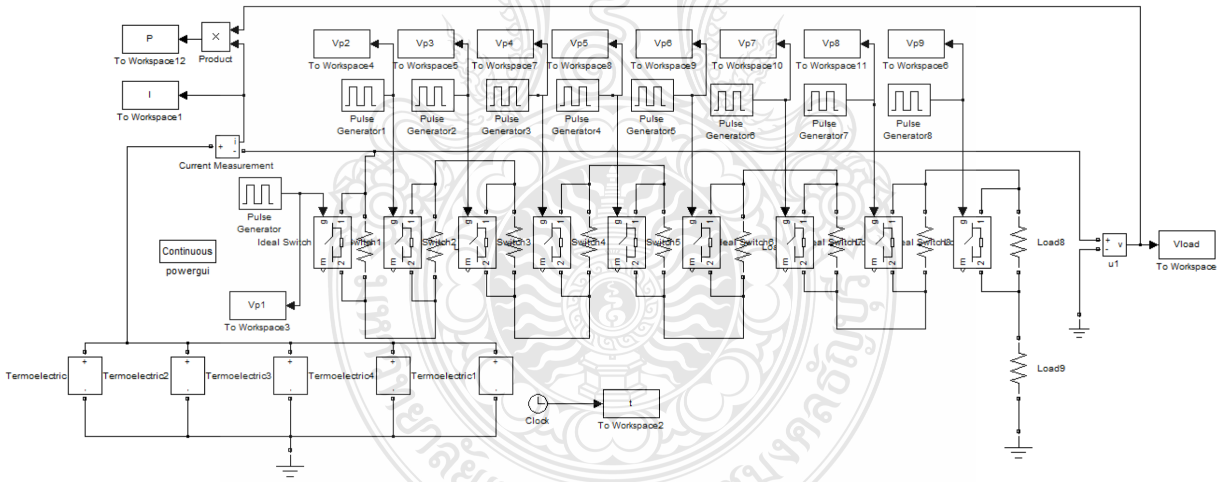
ความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตจะส่งผลให้เกิดปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ซึ่งผลดังกล่าวนี้ทำให้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆ โมดูลมาเชื่อมต่อกัน ความแตกต่างเหล่านี้จะส่งผลถึงการด้อยประสิทธิภาพลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวม



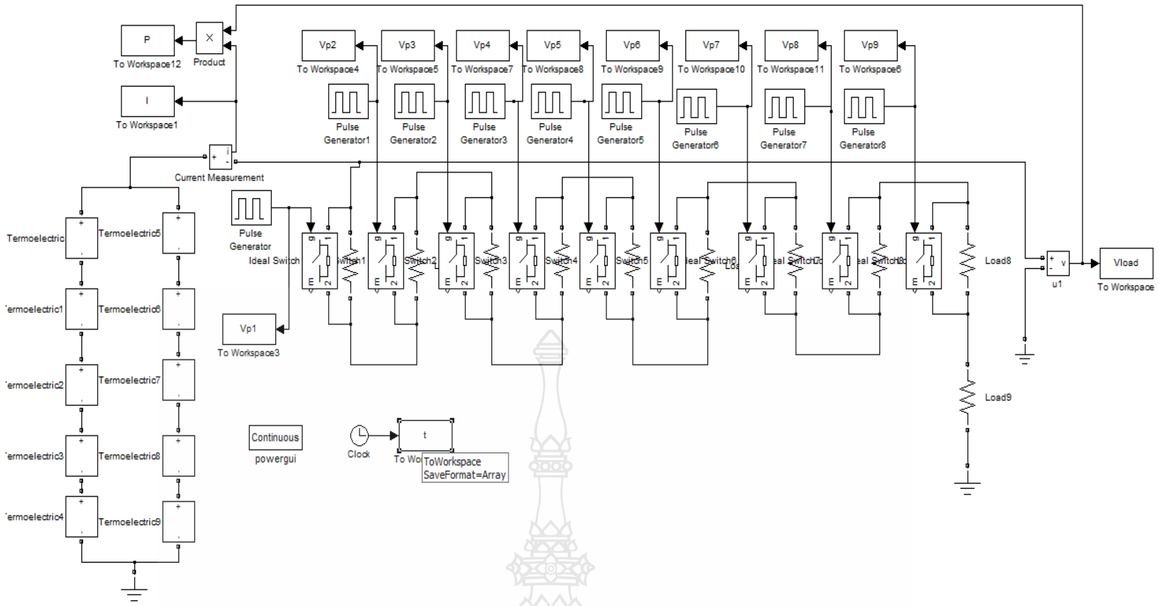
ภาพที่ 3.4 จำลองการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik



ภาพที่ 3.5 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik



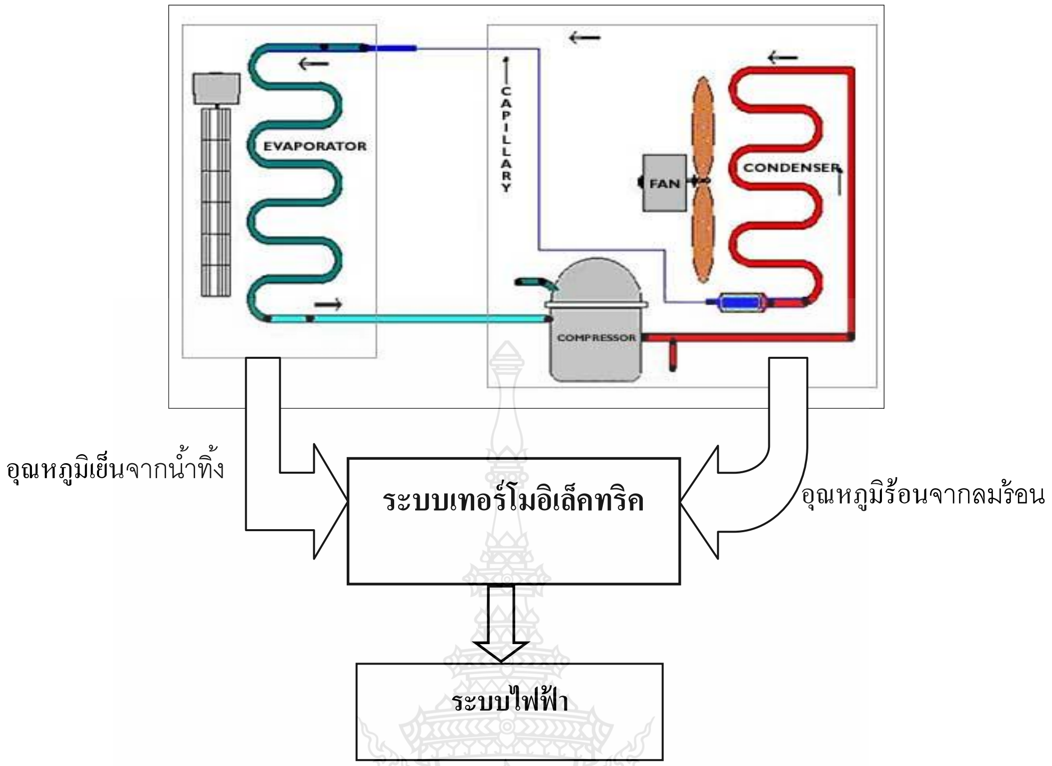
ภาพที่ 3.6 จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik



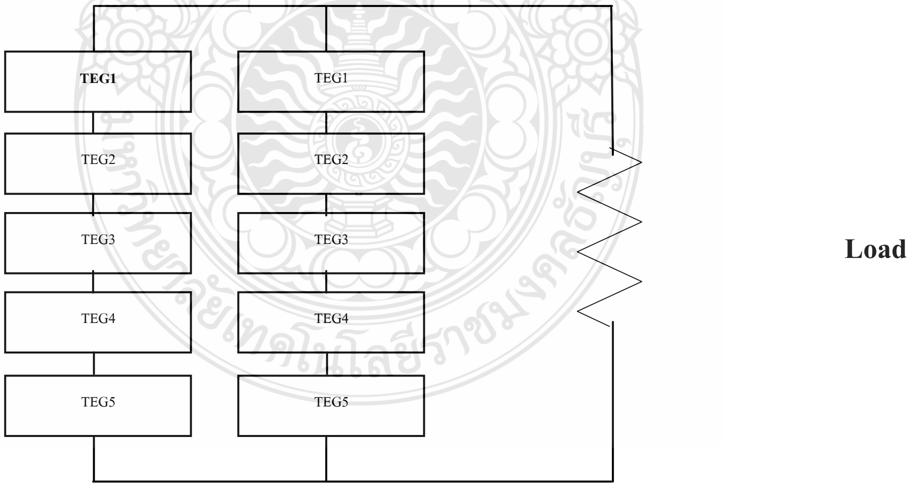
ภาพที่ 3.7 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik

3.4 สร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค

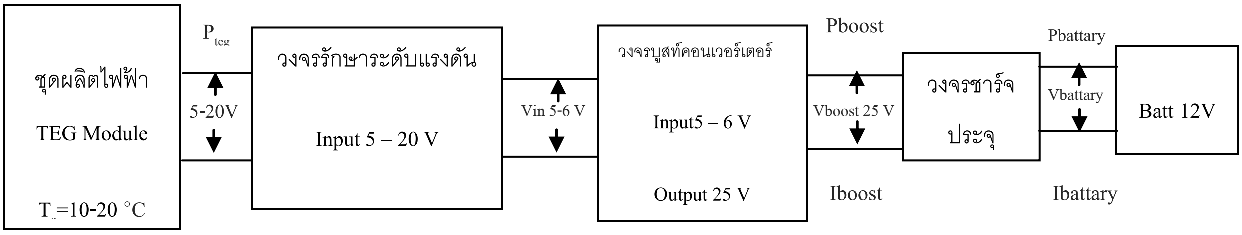
เทอร์โมอิเล็กทริคเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น การต่อวงจรแบบอนุกรมจะทำให้ความต่างศักดิ์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และการต่อวงจรแบบขนานจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น[1,2,3] ในการวิจัยครั้งนี้จึงได้นำชุดเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่ออนุกรมและขนานกัน 10 โมดูลดังแสดงในภาพที่ 3.9 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 3.8 ระบบต้นแบบผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอ



ภาพที่ 3.9 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเจเนอเรเตอร์



ภาพที่ 3.10 ชุดอัดประจุไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเจนเนอร์เรเตอร์

ภาพที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบโครงสร้างของชุดอัดประจุไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเจนเนอร์เรเตอร์ โดยทำการเลือกอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้มาทำการประกอบเป็นชุดอัดประจุไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 3.11 ก.เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันและยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ ในภาพที่ 3.11 ข.เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชุดผลิตไฟฟ้าโมดูลเทอร์โมอิเล็คทริคให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและในภาพที่ 3.11 ค.เป็นชุดไฟฟ้าฉุกเฉินที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ที่ได้จากชุดอัดประจุไฟฟ้า

(ก)โมดูลเพิ่มแรงดัน DC Boost Converter

(ข)อินเวอร์เตอร์ขนาด150วัตต์

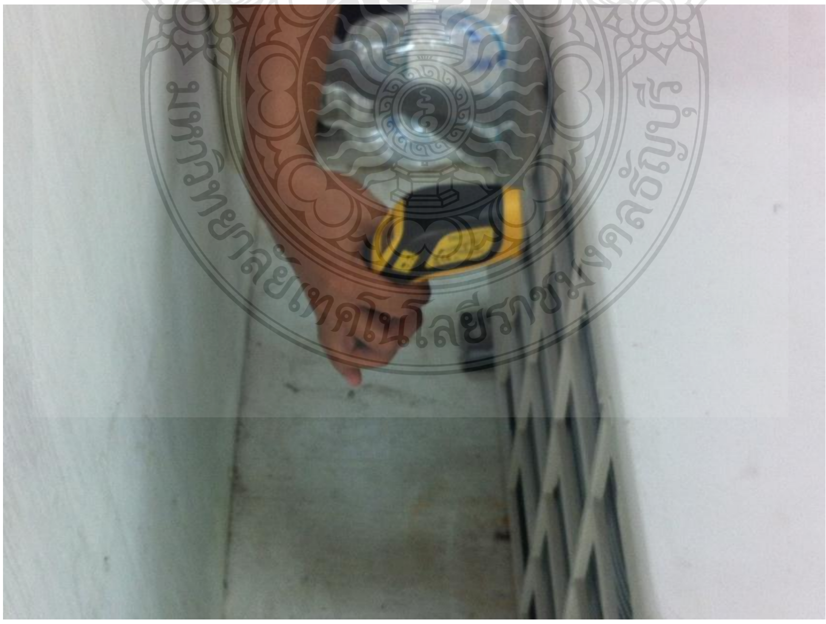
(ค)ชุดไฟฉุกเฉินแรงดันขนาด 12 โวลท์

ภาพที่ 3.11 (ก)โมดูลเพิ่มแรงดัน DC Boost Converter รุ่น Low Voltage Boost (ข)อินเวอร์เตอร์DC to AC ขนาด 150 วัตต์ และ(ค) ชุดไฟฉุกเฉินแรงดันขนาด 12 โวลท์

3.4.1 ตรวจวัดอุณหภูมิทางด้านคอนเดนเซอร์เพื่อหาจุดติดตั้งชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้า

ทำการทดสอบอุณหภูมิด้านคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสูญเปล่า

ภาพที่ 3.12 ตรวจวัดอุณหภูมิด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ



ภาพที่ 3.13 ตรวจวัดอุณหภูมิด้านหลังชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

3.4.2 ดำเนินการติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

ภาพที่ 3.14 ติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

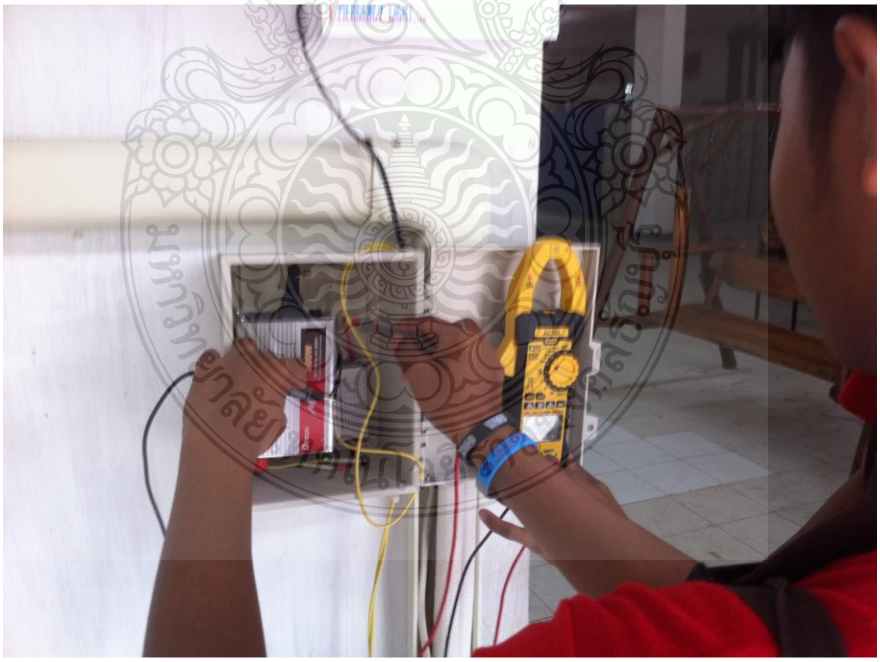
ภาพที่ 3.15 ติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคด้านหน้าชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

3.4.3 ติดตั้งอุปกรณ์ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค

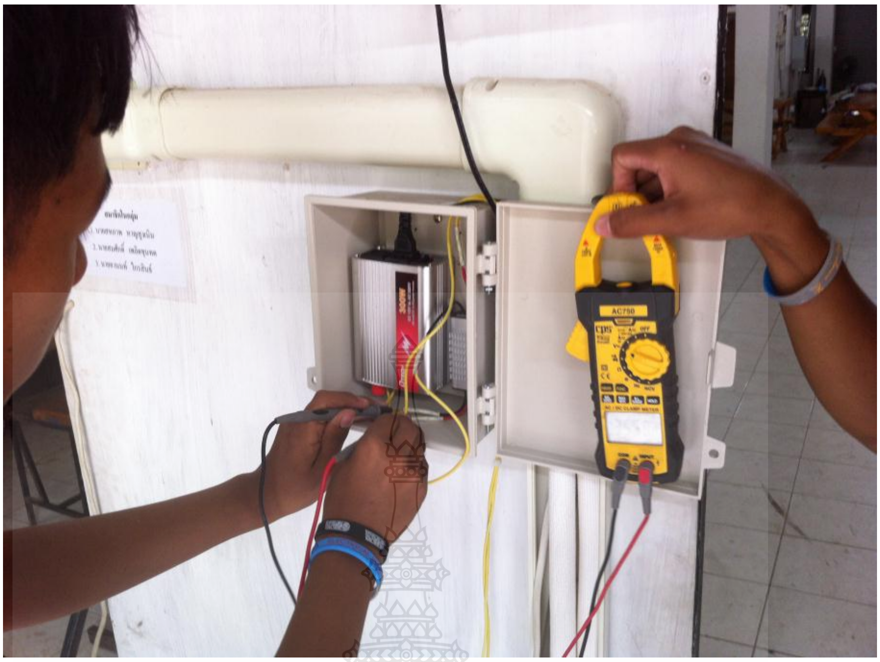
ภาพที่ 3.16 ติดตั้งอุปกรณ์ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

ภาพที่ 3.17 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

ภาพที่ 3.18 เดินสายไฟฟ้าอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค



ภาพที่ 3.19 ทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

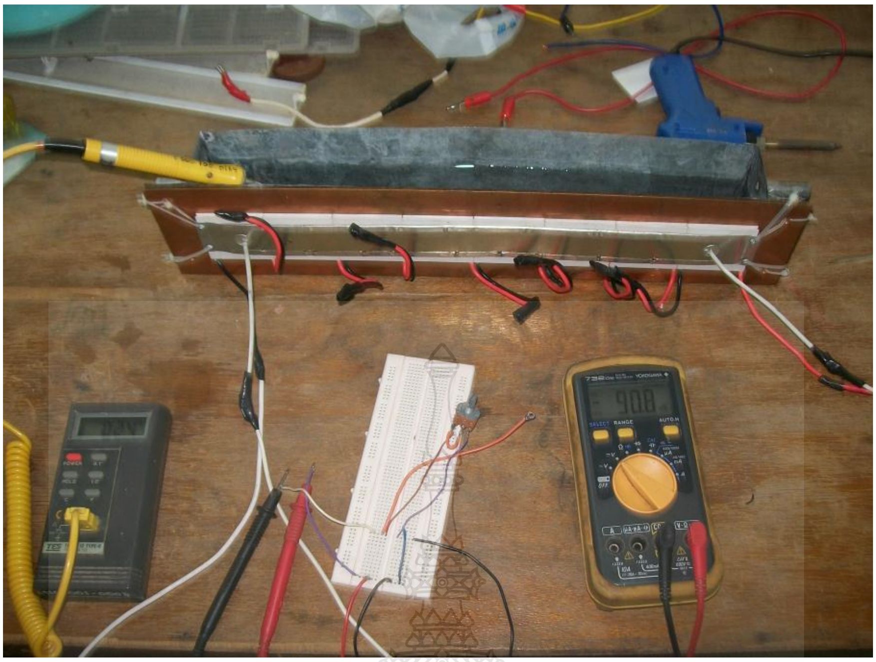


ภาพที่ 3.20 ทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อตรวจสอบหาจุดบกพร่องของชุดผลิตไฟฟ้า

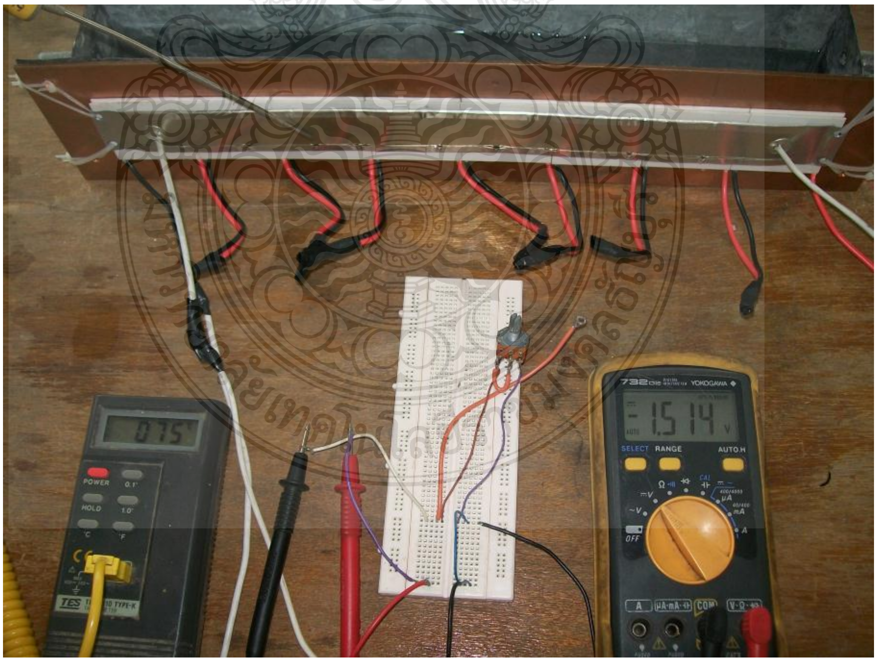
จากภาพที่ 3.12 – 3.20 แสดงขั้นตอนการติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริครวมไปถึงขั้นตอนการตรวจสอบหาจุดบกพร่องในการติดตั้งเพื่อทำการแก้ไขให้พร้อมสำหรับการทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

3.4.4 ทดลองและเก็บข้อมูลผลการทดลองผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อน จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริคจำนวน 4 โมดูลประกอบอยู่บนโครงสร้างระบบเดียวกัน โดยยึดติดผนังด้านร้อนของระบบด้วย ฮีทเตอร์ ขนาด 1000 วัตต์ และผนังด้านเย็นของระบบระบายความร้อนออกด้วยน้ำเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3.20 โดยในการทดลองจะทำการทดสอบคุณสมบัติความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล และทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ทั้งในลักษณะการขนานและการอนุกรม โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 3.21 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของชุดเทอร์โมอิเล็กทริค



ภาพที่ 3.22 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของชุดเทอร์โมอิเล็กทริค

ภาพที่ 3.23 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบอุณหภูมิชุดคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน

ภาพที่ 3.24 บันทึกและเก็บข้อมูลการทดสอบอุณหภูมิชุดคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน

ภาพที่ 3.25 บันทึกและเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าชุดสาธิตขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน

ภาพที่ 3.26 แสดงการผลิตไฟฟ้าเพื่อชาร์จประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าฉุกเฉินของชุดสาธิตขณะที่เครื่องปรับอากาศทำงาน

จากภาพที่ 3.21 – 3.26 แสดงขั้นตอนการบันทึกข้อมูลชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค เพื่อทำการแก้ไขให้พร้อมสำหรับการทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศ ด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

3.5 สรุป

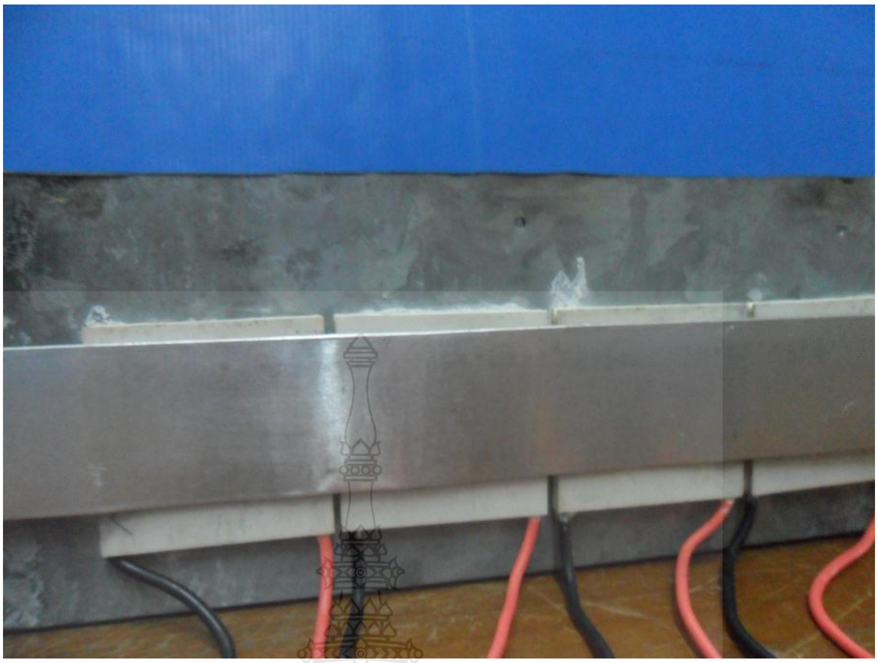
วิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากศึกษาคุณสมบัติการทำงานของชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล การวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ รวบรวมข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวเพื่อหาข้อมูลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulik เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในการสร้างชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริคสามารถประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ เพื่อใช้ในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4
ผลการทดลอง

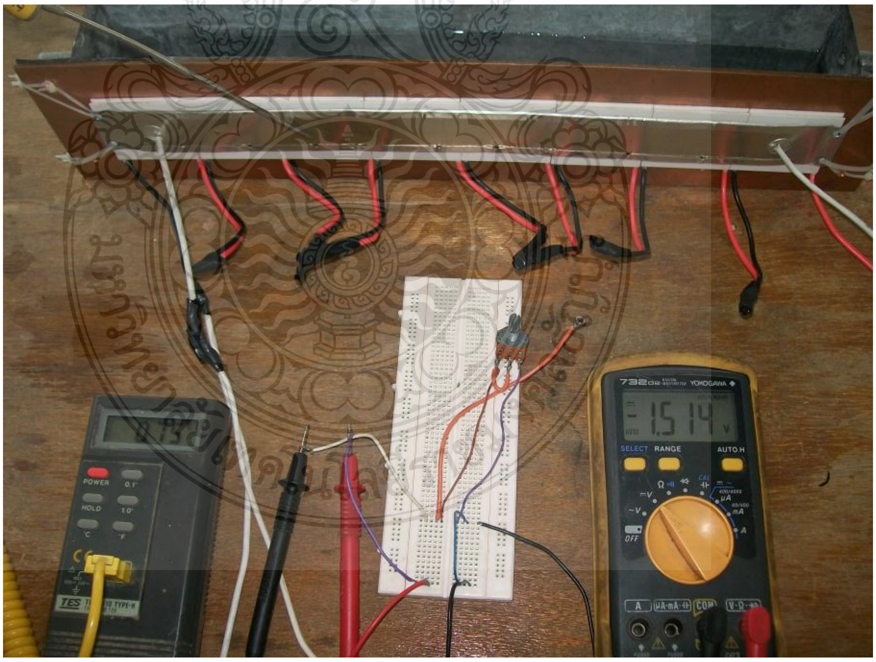
เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ทำการปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด นำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันในลักษณะขนานและอนุกรมและจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik เพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบ และศึกษาการผลิตไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสจากความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล TEG 12750D ตามปรากฏการณ์ซีเบค นำพลังงานที่ได้ไปอัดประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าฉุกเฉินขนาด 12 โวลต์ด้วยแรงดันคงที่ 15 โวลต์

4.1 การทดลองต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อน จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริคจำนวน 4 โมดูล ประกอบอยู่บนโครงสร้างระบบเดียวกัน โดยยึดติดผนังด้านร้อนของระบบด้วย ฮีทเตอร์ ขนาด 1000 วัตต์ และผนังด้านเย็นของระบบระบายความร้อนออกด้วยน้ำเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยในการทดลองจะทำการทดสอบคุณสมบัติความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล และทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ทั้งในลักษณะการขนานและการอนุกรม โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 4.1 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน



ภาพที่ 4.2 การวัดค่าการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

4.1.1 คุณสมบัติของแต่ละโมดูล

จากข้อสมมุติฐานดังที่กล่าวข้างต้นจำเป็นต้องเก็บข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของแต่ละโมดูลไว้เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์ ได้ผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 – 4.4

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของโมดูลที่1 (ริมซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	13.20	9.52	8.89	8.28	7.78	6.82	6.07
แรงดัน (V)	1.06	1.08	0.71	1.09	1.04	0.98	1.08
กำลังไฟฟ้า(mW)	13.99	10.28	6.31	9.03	8.09	6.68	6.56

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 2 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

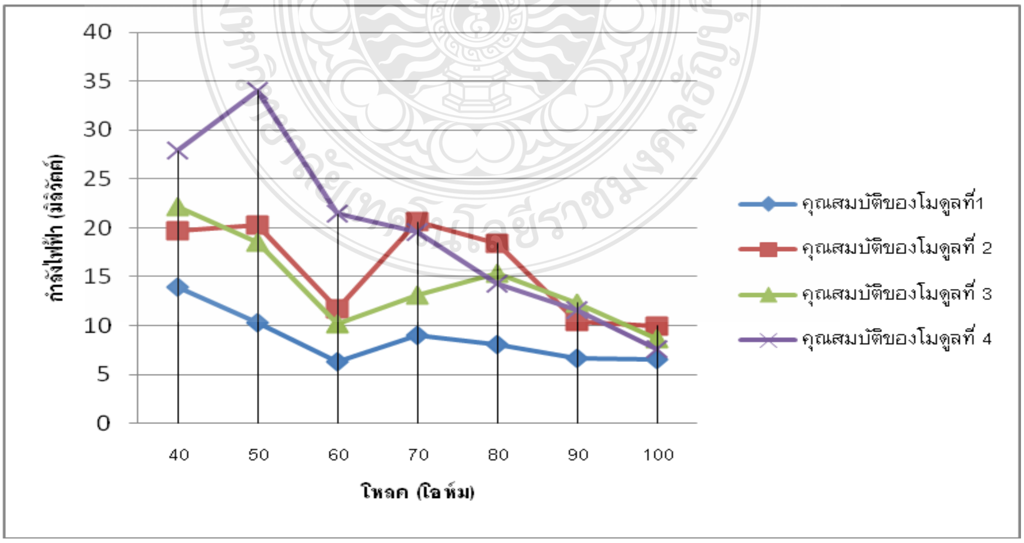
โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.50	19.36	15.64	14.92	12.98	10.58	8.10
แรงดัน (V)	0.84	1.05	0.75	1.38	1.42	0.98	1.23
กำลังไฟฟ้า(mW)	19.74	20.33	11.73	20.59	18.43	10.37	9.96

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 3 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.08	18.46	15.98	13.68	11.63	10.02	7.67
แรงดัน (V)	0.96	1.00	0.64	0.96	1.32	1.23	1.13
กำลังไฟฟ้า(mW)	22.16	18.46	10.23	13.13	15.35	12.32	8.67

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวริมขวา) ที่T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.26	21.98	17.86	14.57	10.53	9.07	6.43
แรงดัน (V)	1.20	1.55	1.20	1.34	1.36	1.28	1.18
กำลังไฟฟ้า(mW)	27.91	34.07	21.43	19.52	14.32	11.61	7.59



ภาพที่ 4.3 กราฟคุณสมบัติของโมดูล

จากการทดลองโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลจะเห็นว่าภายใต้การรับความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเราทำการเพิ่มโหลด จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลง เนื่องด้วยความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตจะส่งผลให้เกิดปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ทำให้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมส่งผลถึงการด้อยประสิทธิภาพลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวม โมดูลที่ 4 ให้กำลังไฟฟ้าออกได้ดีที่สุด ขณะที่โมดูลที่ 2 และ 3 ให้กำลังไฟฟ้าที่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนโมดูลที่ 1 จะให้กำลังไฟฟ้าได้ดีต่ำที่สุด จากภาพที่ 4.3 ผลที่ได้นี้เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

4.1.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล มาต่อร่วมกันแบบอนุกรมโดยเพิ่มจำนวนโมดูลเชื่อมต่อทีละโมดูล จากการทดลองตามตารางที่ 4.5 – 4.7 ตามลำดับค่าแรงดันที่ได้เพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่เป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง โดยที่ค่าแรงดันคงที่ ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแต่ละโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวมลดลง

ตารางที่ 4.5 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1 และ 2 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

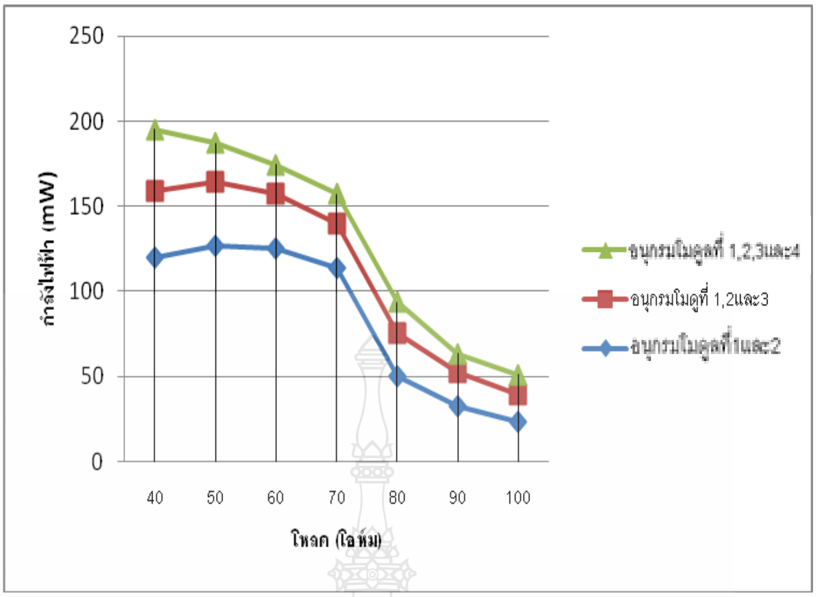
โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	34.33	22.96	14.78	14.89	10.26	10.08	9.82
แรงดัน (V)	1.06	0.98	1.14	1.16	1.78	1.11	1.17
กำลังไฟฟ้า(mW)	36.39	22.50	16.85	17.27	18.26	11.19	11.49

ตารางที่ 4.6 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1,2 และ 3 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	33.68	24.35	23.42	21.02	20.81	18.12	17.61
แรงดัน (V)	1.14	1.56	1.38	1.27	1.21	1.10	0.90
กำลังไฟฟ้า(mW)	38.40	37.99	32.32	26.70	25.18	19.93	15.85

ตารางที่ 4.7 ผลการอนุกรมโมดูลที่ 1,2,3 และ 4 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	54.4	46.7	44.0	37.2	18.86	17.84	14.46
แรงดัน (V)	2.21	2.71	2.85	3.05	2.67	1.82	1.64
กำลังไฟฟ้า (mW)	120.22	126.56	125.40	113.46	50.36	32.47	23.71



ภาพที่ 4.4 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรม

4.1.3 การขนานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล มาต่อร่วมกันแบบขนานโดยเพิ่มจำนวนโมดูลเชื่อมต่อทีละโมดูล จากการทดลองตามตารางที่ 4.8 – 4.10 ตามลำดับค่าแรงดันที่ได้คงที่ กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ โดยที่ค่าแรงดันลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแต่ละโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวมลดลงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 4.8 ผลการขนานโมดูลที่ 1 และ 2 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

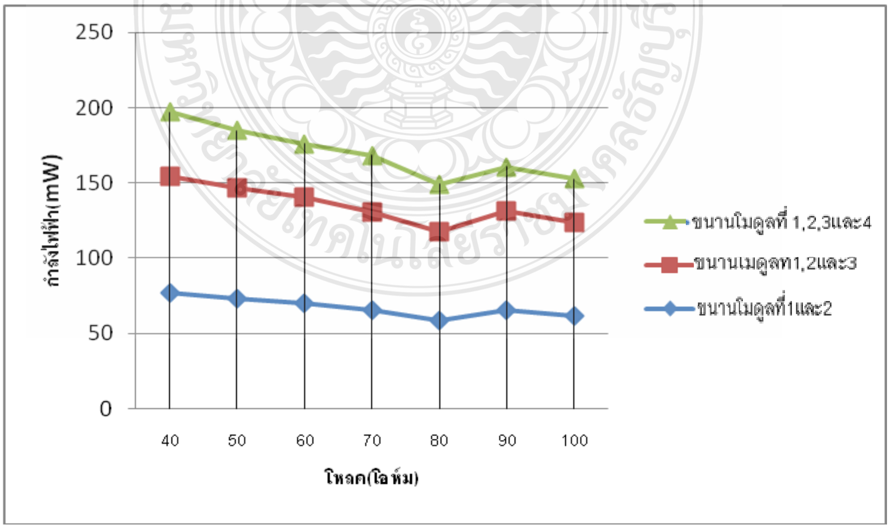
โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	40.43	35.68	35.02	34.22	30.15	29.74	27.36
แรงดัน (V)	1.06	1.08	1.02	1.09	1.04	0.98	1.07
กำลังไฟฟ้า(mW)	42.86	38.53	35.72	37.30	31.36	29.15	29.28

ตารางที่ 4.9 ผลการขนานโมดูลที่ 1,2 และ 3 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	67.69	65.34	65.01	62.32	60.19	58.76	56.65
แรงดัน (V)	1.14	1.12	1.08	1.05	0.98	1.12	1.09
กำลังไฟฟ้า(mW)	77.17	73.18	70.21	65.44	58.99	65.81	61.75

ตารางที่ 4.10 ผลการขนานโมดูลที่ 1, 2, 3 และ4 (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	88.59	87.59	84.23	82.79	81.05	79.84	76.54
แรงดัน (V)	1.49	1.62	1.45	1.50	1.32	1.56	1.42
กำลังไฟฟ้า(mW)	132.00	141.90	122.13	124.19	106.99	124.55	108.69



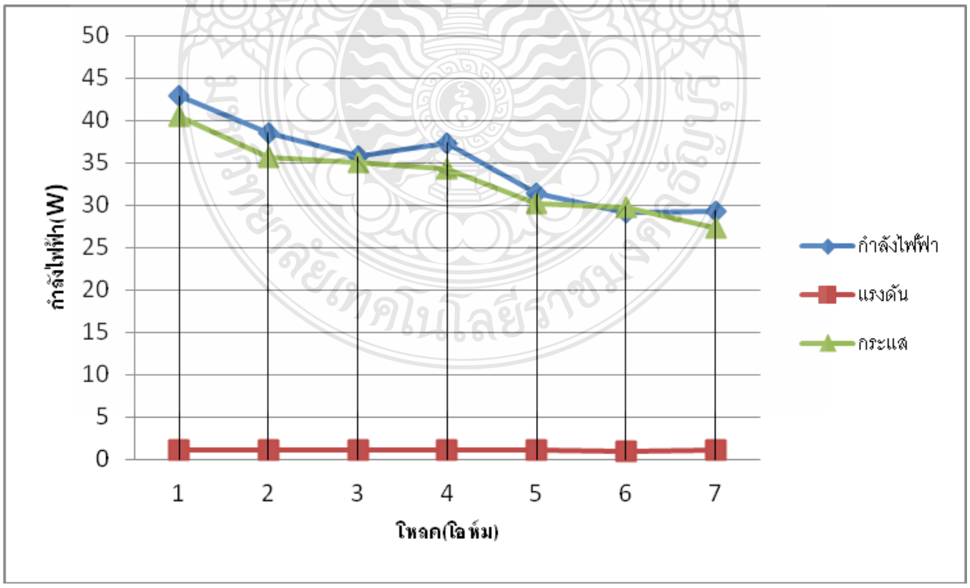
ภาพที่ 4.5 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบขนาน

4.1.4 การอนุกรมและขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล มาต่อร่วมกันแบบขนานโดยเพิ่มจำนวนโมดูลเชื่อมต่อทีละโมดูล จากการทดลองตามตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ โดยที่ค่าแรงดันลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแต่ละโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวมลดลงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 4.11 ผลการอนุกรมและขนานโมดูล (T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	40.43	35.68	35.02	34.22	30.15	29.74	27.36
แรงดัน (V)	1.06	1.08	1.02	1.09	1.04	0.98	1.07
กำลังไฟฟ้า(mW)	42.86	38.53	35.72	37.30	31.36	29.15	29.28



ภาพที่ 4.6 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรมและขนาน

4.2 ผลการทดลองคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคเปรียบเทียบผลกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik

จากสมการที่ 2.4 นำมาเขียนสมการจำลองการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในโปรแกรม Matlab Simulik เพื่อใช้วิเคราะห์การทำงานเปรียบเทียบกับชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค สามารถเก็บข้อมูลเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.12 – 4.14

4.2.1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

จากข้อสมมุติฐานดังที่กล่าวข้างต้น จำเป็นต้องเก็บข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของแต่ละโมดูลไว้เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์ ได้ผลการทดสอบในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	2.97	2.78	2.54	2.16	1.87	1.54	1.42	1.22	1.05	0.94	0.67
แรงดัน (V)	2.78	2.97	3.01	3.12	3.17	3.20	3.57	3.81	4.07	4.24	4.78
กำลังไฟฟ้า(W)	8.26	8.26	7.65	6.74	5.93	4.93	5.07	4.65	4.27	3.99	3.20

4.2.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันแบบอนุกรม ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ผลดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการอนุกรมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	8.91	8.04	7.29	6.72	6.36	5.31	4.77	4.32	3.63	3.33	2.76
แรงดัน (V)	8.34	8.91	9.03	9.36	9.51	9.6	10.71	11.43	12.21	12.72	14.34
กำลังไฟฟ้า(W)	74.31	71.64	65.83	62.90	60.48	50.98	51.09	49.38	44.32	42.36	39.58

4.2.3 การขนานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันแบบขนาน ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ผลดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการขนานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	5.94	4.88	4.26	3.78	3.84	3.08	2.44	1.88	1.74	1.88	1.22
แรงดัน (V)	5.56	5.94	6.02	6.24	6.34	6.4	7.14	7.62	8.14	8.48	9.56
กำลังไฟฟ้า(W)	33.03	28.99	25.65	23.59	24.35	19.71	17.42	14.33	14.16	15.94	11.66

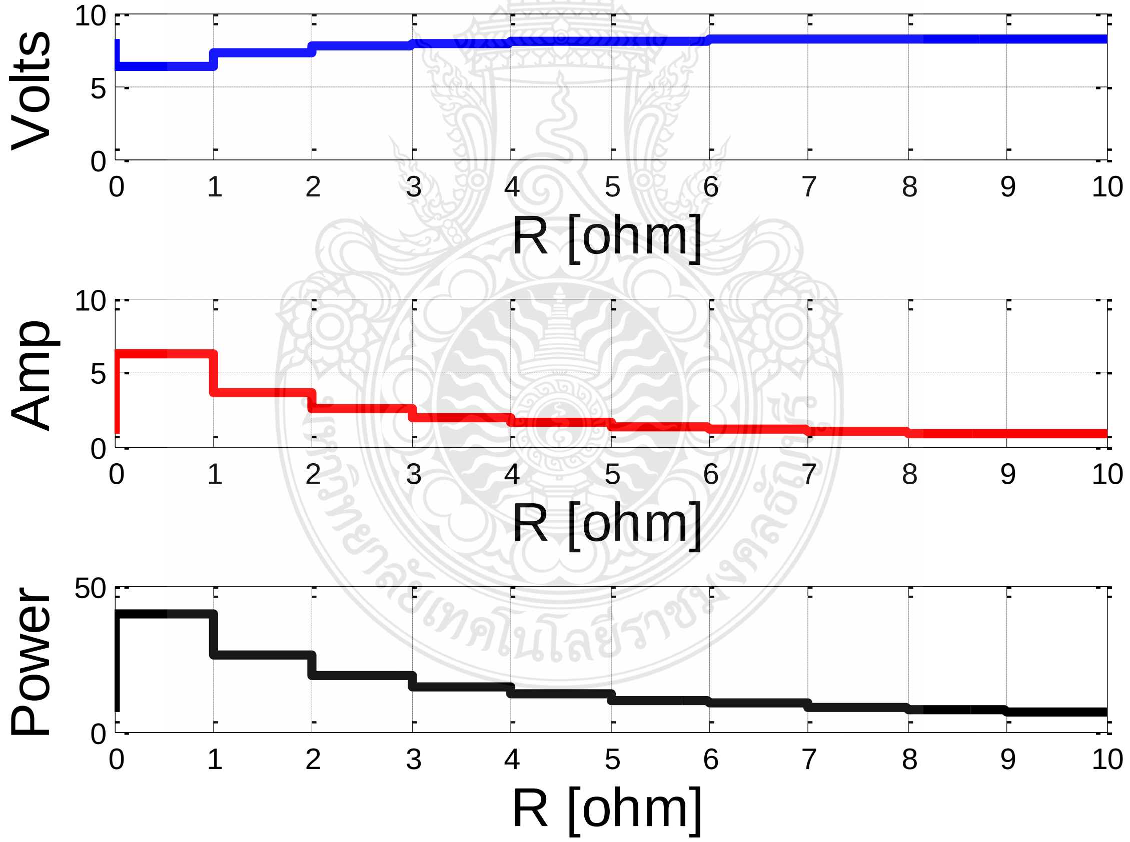
4.2.4 การอนุกรมและขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันแบบอนุกรมแล้วนำมาขนานกัน ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ผลดังตารางที่ 4.15

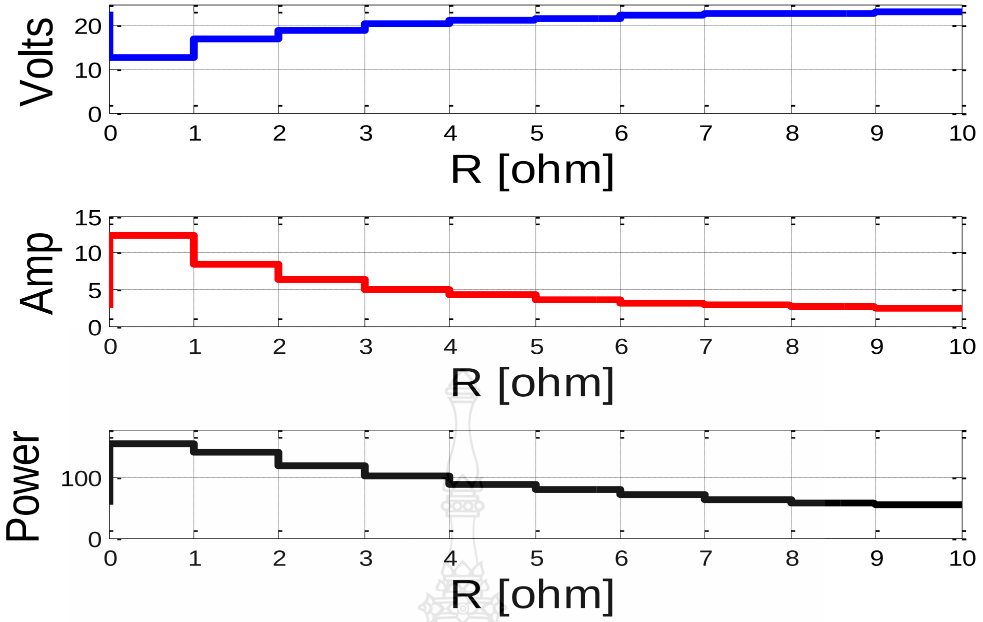
ตารางที่ 4.15 ผลการอนุกรมและขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	9.15	9.14	9.11	9.04	8.98	8.96	8.56	8.42	8.10	7.95	7.52
แรงดัน (V)	12.51	12.44	12.38	12.10	12.04	11.78	11.46	11.26	11.14	11.08	10.94
กำลังไฟฟ้า(W)	114.47	113.70	112.78	109.38	108.12	105.55	98.10	94.81	90.23	88.09	82.27

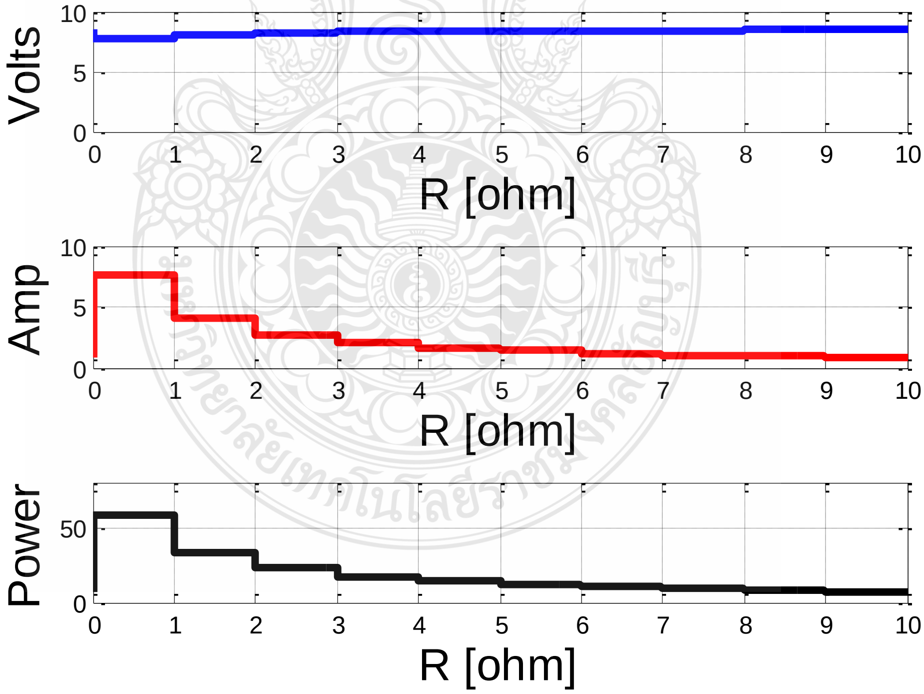
4.3 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



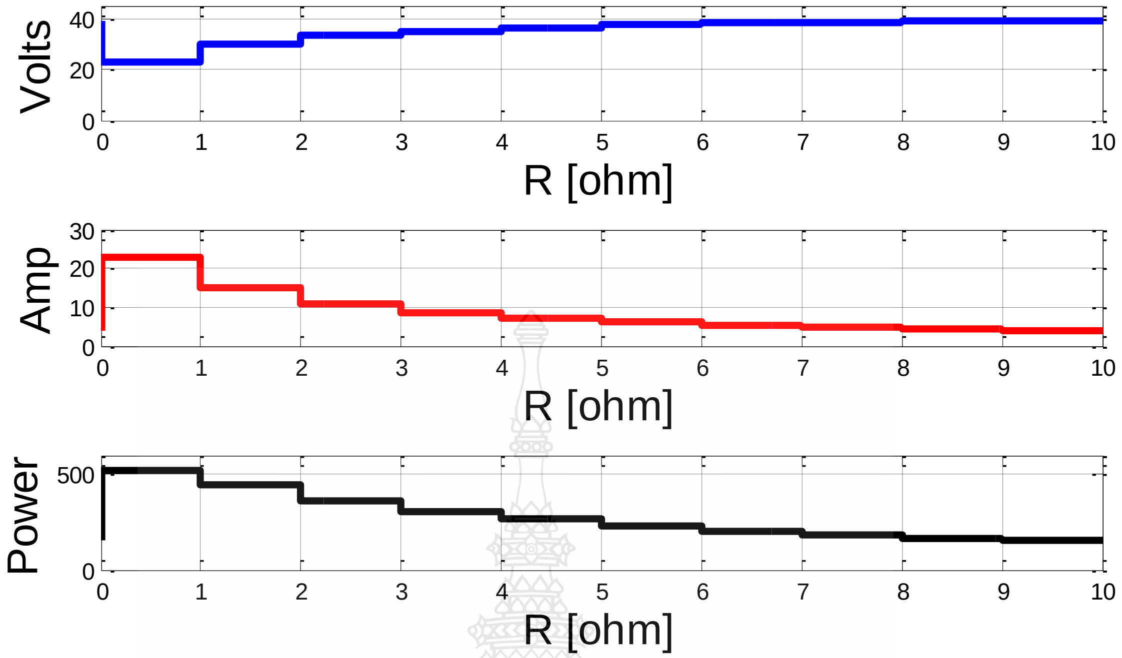
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



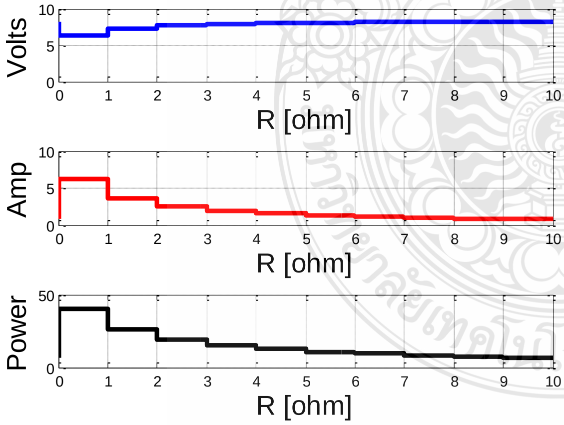
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik



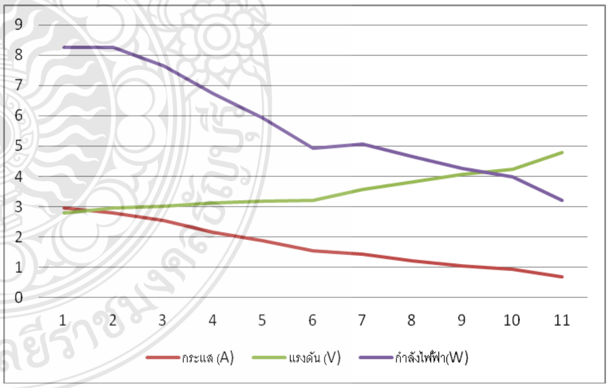
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik

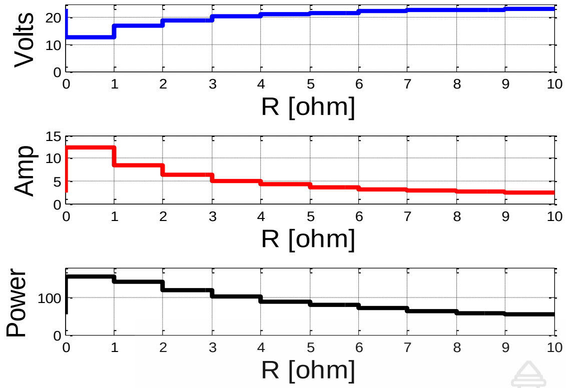


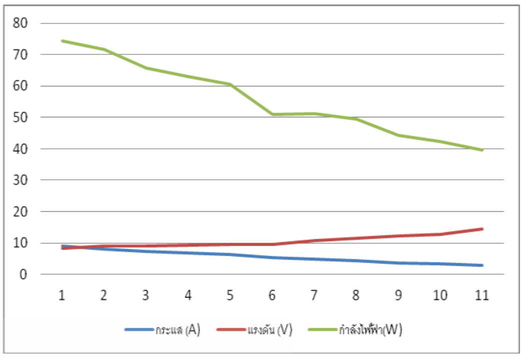
(ก)ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



(ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

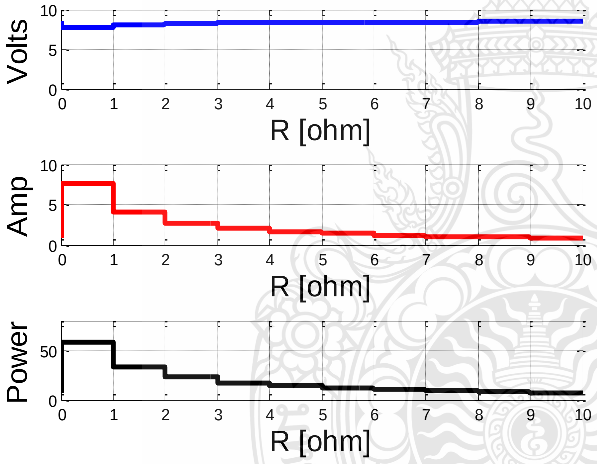
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริคเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)

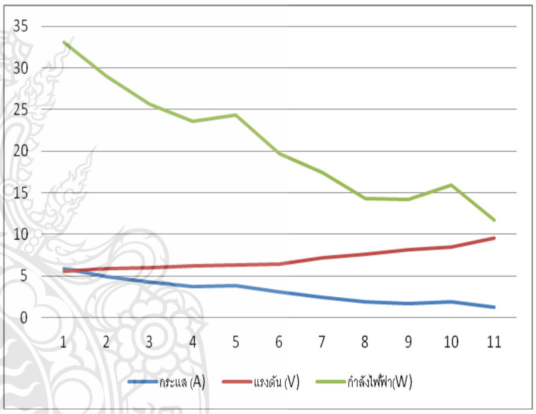




(ก)ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

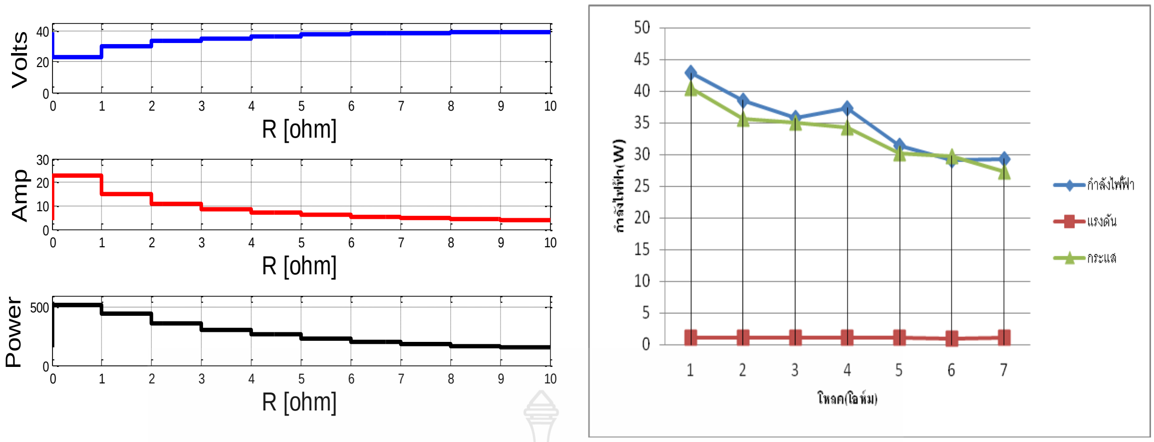
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)





(ก) ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)



(ก) ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)

4.4 การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยวิธีการเทอร์โมอิเล็คทริค เพื่อประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าฉุกเฉิน

การทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟสำรอง ในการทดสอบแรงดันที่ผลิตได้มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องยกระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้มีค่าแรงดันสูงขึ้นโดยตั้งค่าแรงดันขาออกไว้ที่ 20 โวลต์และแรงดันอัดประจุอยู่ที่ 15 โวลต์ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามผลต่างแรงดันวงจรอัดประจุกับแรงดันแบตเตอรี่ ขณะเริ่มต้นแรงดันในแบตเตอรี่น้อย กระแสอัดประจุจะมีปริมาณมากและจะลดลงตามลำดับ ในขณะที่แรงดันอัดประจุยังคงที่อยู่ โดยวงจรในการอัดประจุแบตเตอรี่ประกอบด้วย ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค วงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์ และวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริคและมีการนำไปต่อกับโหลดจะทำให้แรงดันตกลงดังนั้นจึงใช้วงจรรักษาระดับแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ และใช้วงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อยกระดับแรงดันที่ได้จากวงจรให้มีค่าสูงขึ้น โดยทั่วไปสามารถยกระดับแรงดันได้ประมาณ 1 – 4 เท่าของแรงดันอินพุทและนำไปชาร์จแบตเตอรีด้วยวงจรประจุแบตเตอรี่ต่อไป

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้ากับคอนเดนเซอร์

α=(3.5 × 10^{-2})(V/K),R=(6.508 × 10^{-3})(โอห์ม), Kt=(2.8 × 10^{-3})(Watt/cm-K),n=(127)

เวลา ชม.	T_h °C	T_c °C	ΔT °C	V_{teg} V	I_{teg} A	P_{teg} W	V_{boost} V	I_{boost} A	P_{boost} W	$V_{battary}$ V	$I_{battary}$ A	$P_{battary}$ W	Q_h W	η %
0.5	45	10	35	5.23	1.23	6.44	20.00	1.25	25.00	15.65	0.41	5.48	257.85	2.50
1.0	46	12	34	5.21	1.21	6.30	20.02	1.22	24.42	15.57	0.40	5.29	258.89	2.43
1.5	49	12	37	5.27	1.18	6.24	20.05	1.22	24.46	15.50	0.40	4.34	269.59	2.31
2.0	50	14	36	5.24	1.15	6.05	20.07	1.20	24.08	15.42	0.39	4.16	267.84	2.26
2.5	52	14	38	5.29	1.10	5.82	20.08	1.15	23.09	15.34	0.37	3.84	267.27	2.18
3.0	52	15	37	5.27	1.06	5.57	20.03	1.10	22.03	15.17	0.36	3.64	257.70	2.16
3.5	53	17	36	5.24	0.99	5.20	20.04	1.05	21.04	14.97	0.34	3.29	245.63	2.12

คำนวณค่าที่เวลา 0.5 ชม.

$$Q_h = n(\alpha IT_h - 0.5I^2 R + Kt\,\Delta T)$$

$$= 127[((3.5 \times 10^{-2}) \times 1.23 \times 45) - (0.5 \times 1.23^2 \times (6.508 \times 10^{-3})) + ((2.8 \times 10^{-3}) \times (45-10))]$$

$$= 257.85 \text{ W}$$

คำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเทอร์โมอิเล็คทริคหาจากสมการ = $(P/Q_h) \times 100$

$$\eta = \frac{6.44}{257.85} \times 100 = 2.50\%$$

โดยที่ Qc / Qh คือ ปริมาณความเย็นหรือความร้อนที่ให้กับเทอร์โมอิเล็คทริค (W)

α คือ สัมประสิทธิ์ของซีเบค (3.5×10^{-2})(V/K)

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็น (K)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริค(6.508×10^{-3})(โอห์ม)

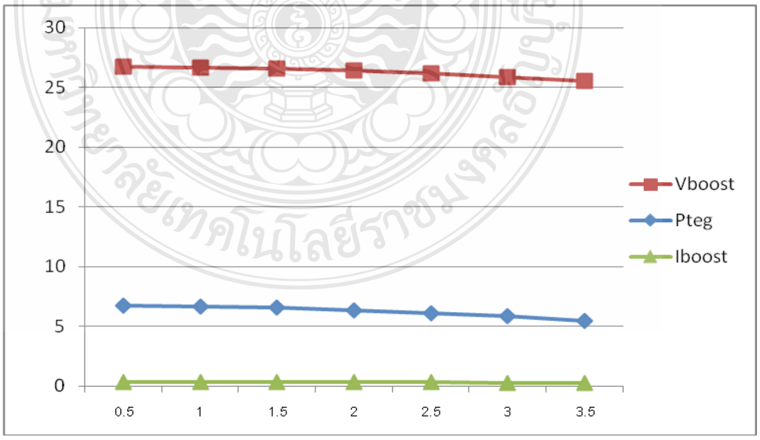
I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

Tc / Th คือ อุณหภูมิด้านเย็นหรือด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริค (K)

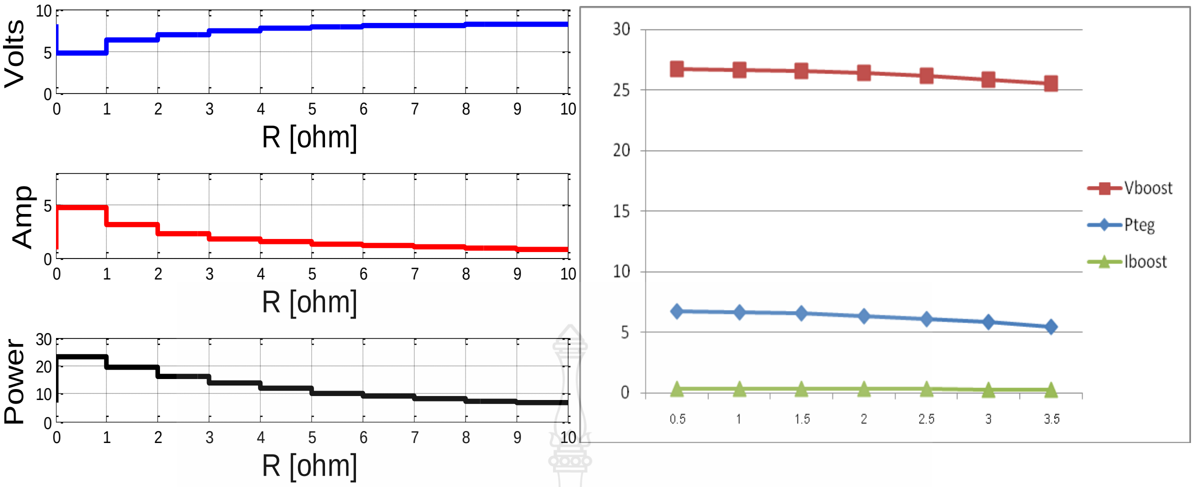
Kt คือ ค่าสภาพนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริค (2.8×10^{-3})(Watt/cm-K)

n คือ จำนวนเทอร์โมอิเล็คทริคใน 1 โมดูล(127)

จากตารางที่ 4.16 อุณหภูมิด้านร้อนจากคอนเดนเซอร์มีค่าประมาณ 52 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว เมื่ออุณหภูมิผลต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นคงที่ สามารถคำนวณกำลังวัตต์ของเทอร์โมอิเล็กทริค ได้ที่ 5.95 วัตต์ ค่าแรงดัน 20.04 โวลต์ กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ สามารถนำพลังงานที่ได้ไปอัดประจุ แบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ด้วยแรงดันคงที่ 15 โวลต์ ขณะทำการประจุแรงดัน กระแสจะค่อยๆลดลงจาก 0.41 แอมแปร์เหลือ 0.34 แอมแปร์เมื่อแบตเตอรี่มีความจุเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าคือแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าและการควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิให้มีค่าสูงสุดจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.15 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบอนุกรมและขนานที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ

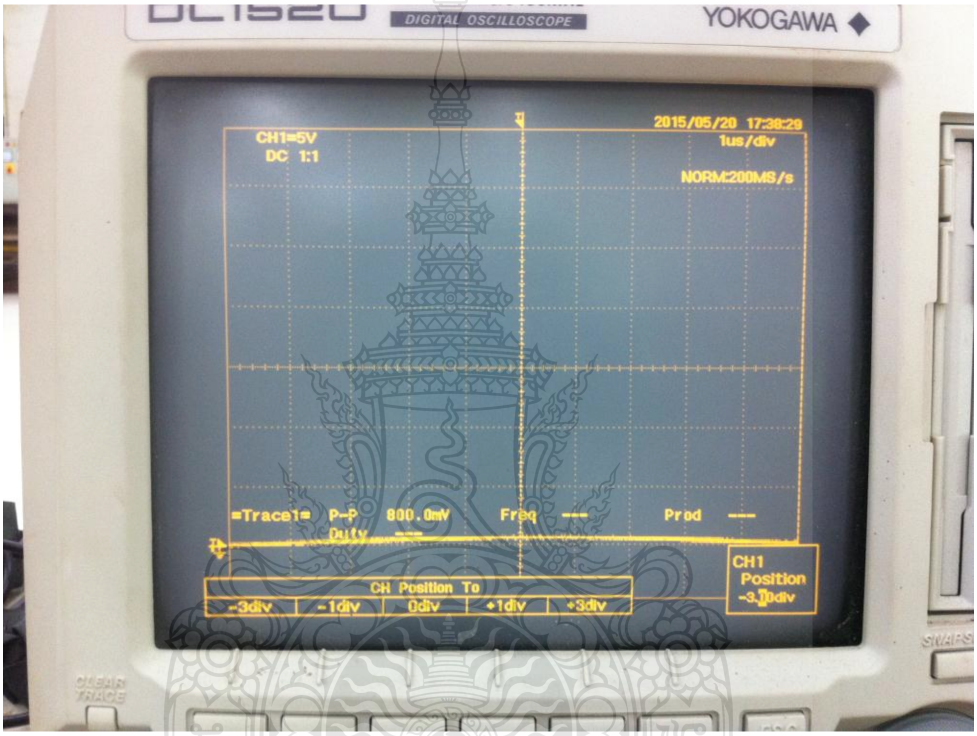


(ก) ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)

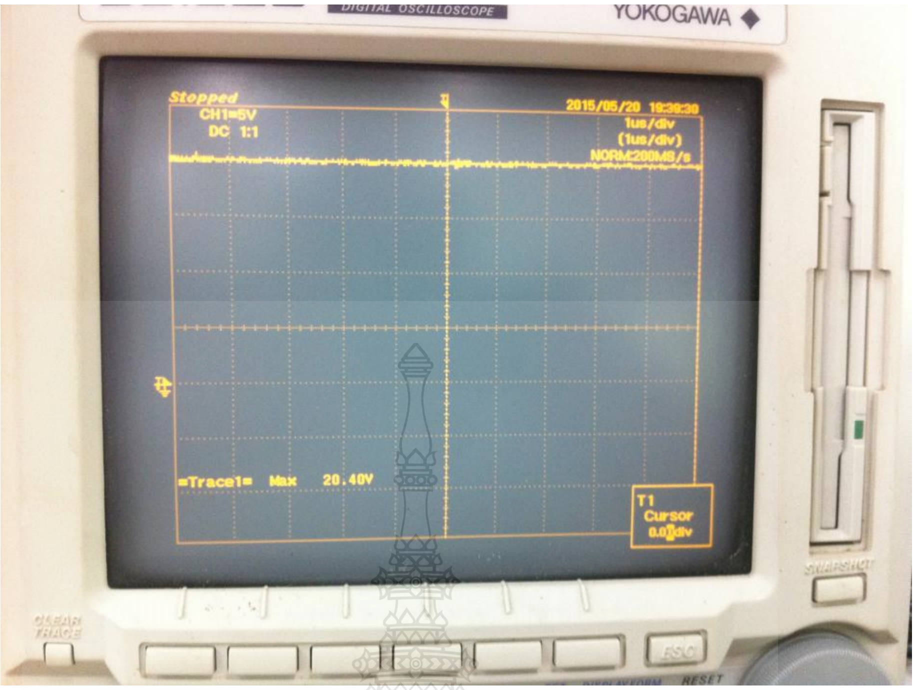
ภาพที่ 4.17 คลื่นสัญญาณแรงดันขาออกของเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูที่ต่ออนุกรมและขนานกัน

จากภาพที่ 4.17 แสดงการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาออกของเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูที่ต่ออนุกรมและขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริคที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศได้แรงดันออกมาที่ 5.20 โวลต์ รูปคลื่นที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง จากนั้นจึงนำแรงดันที่ได้ไปเข้ากับวงจรยกระดับแรงดันต่อไป



ภาพที่ 4.18 คลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้าก่อนทำการวัด

จากภาพที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันก่อนทำการวัดคลื่นสัญญาณที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ



ภาพที่ 4.19 คลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.19 แสดงการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากชุดยกระดับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศได้แรงดันออกมาที่ 20.40 โวลต์ รูปคลื่นที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อได้แรงดันที่ออกจากวงจรยกระดับแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับวงจรชาร์จประจุและทำการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ต่อไป

4.5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจะเห็นว่าเมื่อเราทำการเพิ่มโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วยและเมื่อทำการทดสอบวัดค่ากำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจากการเชื่อมต่อกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคทั้งการเชื่อมต่ออนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคและการเชื่อมต่อขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเปลี่ยนสำหรับการต่อแบบอนุกรมนั้นมีค่าต่ำกว่าการต่อแบบขนาน ถ้าพิจารณาในสภาพเลวร้ายที่เป็นไปได้ เช่นมีปัจจัยทำให้คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแตกต่างกัน การต่อแบบขนานจะให้ค่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบอนุกรม ความจริงข้อนี้สามารถนำไปใช้พิจารณาการใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคได้โดยยึดหลักว่าหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยปราศจากวงจรแปลงผันไฟฟ้า การต่อแบบ

อนุกรมจะใช้งานกับโหลดได้ย่านกว้างกว่าการต่อแบบขนาน ในทางตรงข้ามหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคร่วมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่สามารถโปรแกรมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ [4] การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในรูปแบบขนานจะให้ประสิทธิภาพกำลังสูงกว่า ผลที่ได้นี้เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มโมดูลมากขึ้นผลการทดลองกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการเชื่อมต่อแบบขนานจะมีค่าแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมปรากฏว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการทดลองในสภาพอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนนั้นมีความแตกต่างอุณหภูมิที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการจำลองการทดสอบข้างต้น ในการทดสอบแรงดันที่ผลิตได้มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องยกระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้มีค่าแรงดันสูงขึ้นโดยตั้งค่าแรงดันขาออกไว้ที่ 20 โวลต์และแรงดันอัดประจุอยู่ที่ 15 โวลต์ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามผลต่างแรงดันวงจรอัดประจุกับแรงดันแบตเตอรี่

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในสภาวะปัจจุบันแหล่งพลังงานต่าง ๆ เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก พลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล คือ ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์และน้ำมันดีเซล พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานจากชีวมวล ยังมีกำลังการผลิตที่น้อยมาก เป็นผลให้การผลิตไฟฟ้ามีราคาต้นทุนที่แพงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดโลก

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็คทริคเข้ามาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์และยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีขนาดเล็กกะทัดรัด โครงการวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็คทริค โดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้มาผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานจากความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง

ซึ่งผลการศึกษาและทดลองพบว่า ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนเมื่อเราทำการเพิ่มโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วยและเมื่อทำการทดสอบวัดค่ากำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจากการเชื่อมต่อกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคทั้งการเชื่อมต่ออนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคและการเชื่อมต่อขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเปลี่ยนสำหรับการต่อแบบอนุกรมนั้นมีค่าต่ำกว่าการต่อแบบขนาน ถ้าพิจารณาในสภาพเลวร้ายที่เป็นไปได้ เช่นมีปัจจัยทำให้คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแตกต่างกัน การต่อแบบขนานจะให้ค่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบอนุกรม ความจริงข้อนี้สามารถนำไปใช้พิจารณาการใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคได้ โดยยึดหลักว่าหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยปราศจากวงจรแปลงผันไฟฟ้า การต่อแบบอนุกรมจะใช้งานกับโหลดได้ย่านกว้างกว่าการต่อแบบขนาน ในทางตรงข้ามหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคร่วมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่สามารถโปรแกรมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในรูปแบบขนานจะให้ประสิทธิภาพกำลังสูงกว่า ผลที่ได้นี้

เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มโมดูลมากขึ้นผลการทดลองกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการเชื่อมต่อแบบขนานจะมีค่าแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมปรากฏว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟฉุกเฉิน ในการทดสอบแรงดันที่ผลิตได้มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องยกระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้มีค่าแรงดันสูงขึ้นโดยตั้งค่าแรงดันขาออกไว้ที่ 20 โวลต์และแรงดันอัดประจุอยู่ที่ 15 โวลต์ ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามผลต่างแรงดันวงจรอัดประจุกับแรงดันแบตเตอรี่ ขณะเริ่มต้นแรงดันในแบตเตอรี่น้อย กระแสอัดประจุจะมีปริมาณมากและจะลดลงตามลำดับ ในขณะที่แรงดันอัดประจุยังคงที่อยู่ โดยวงจรในการอัดประจุแบตเตอรี่ประกอบด้วย ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค วงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์ และวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริคและมีการนำไปต่อกับโหลดจะทำให้แรงดันตกลงดังนั้นจึงใช้วงจรรักษาระดับแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ และใช้วงจรบูสท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อยกระดับแรงดันที่ได้จากวงจรให้มีค่าสูงขึ้น โดยทั่วไปสามารถยกระดับแรงดันได้ประมาณ 1 – 4 เท่าของแรงดันอินพุทและนำไปชาร์จแบตเตอรีด้วยวงจรประจุแบตเตอรี่ต่อไป ที่อุณหภูมิด้านร้อนจากคอนเดนเซอร์มีค่าประมาณ 52 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัวเมื่ออุณหภูมิผลต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นคงที่สามารถคำนวณกำลังวัตต์ของเทอร์โมอิเล็กทริคได้ที่ 5.95 วัตต์ ค่าแรงดัน 20.04 โวลต์ กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ สามารถนำพลังงานที่ได้ไปอัดประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าสำรองขนาด 12 โวลต์ด้วยแรงดันคงที่ 15 โวลต์ ขณะทำการประจุแรงดัน กระแสจะค่อยๆลดลงจาก 0.41 แอมแปร์เหลือ 0.34 แอมแปร์ เมื่อแบตเตอรี่มีความจุเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าคือแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าและการควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิให้มีค่าสูงสุดจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการวิจัยครั้งนี้สามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อประจุแบตเตอรี่ไฟฟ้าฉุกเฉินขนาด 6 โวลต์ได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นแนวทางในการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองการทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ไฟฉุกเฉิน หากต้องการนำพลังงานจากระบบมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นจะต้องเพิ่มจำนวนของ

เทอร์โมอิเล็กทริคให้มากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพียงพอต่อการใช้งานกับโหลดที่เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาสร้างวงจรควบคุมการทำงานของชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค ควรศึกษาวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งการติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้าเพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น วิเคราะห์หาแหล่งความร้อนและการควบคุมผลต่างอุณหภูมิทำให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด พัฒนาระบบให้สามารถผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานทางเลือกความร้อนประเภทอื่นๆ ได้เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้ที่มีความสนใจงานทางด้านเทคโนโลยีของเทอร์โมอิเล็กทริค การประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริคหรือกักเก็บในระบบสำรองพลังงาน ต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] ณัฐ จันท์ครบ ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน อมร สมเจตน์เลิศเจริญ และเจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, “การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของเตาหุงต้มในครัวเรือนด้วยเทอร์โมอิเล็กตริก”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 9-10 พฤศจิกายน 2549.หน้า 1194-1196.

[2] Lertsatthanakorn, C., K. Wongsim, N. Jariyanoravisse and N. Suwannata, 2003, **“Experinental Study of a Lamp Thermoelectric Generator”**,The 2nd Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment, Phuket, Thailand,pp.544 – 547.

[3] นพพร พัชรประกิติ*, ยุทธสิทธิ์ แสนเรือน และพันธ์ชัย กาวิชัย, **“ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานเทอร์โมอิเล็คทริค”**,การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1,คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ 31 สิงหาคม 2550

[4] ณัฐ จันท์ครบ,เสรี ชื่นอารมณ์,เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, **“การวิเคราะห์รูปแบบการต่อเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด”**,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5,10-11 พฤษภาคม 2550

[5] Eakburanawat, J. and Boonyaroonate, I., 2005, **"Development of a thermoelectric battery charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique"**, *Applied Energy*, Vol. 83, issue. 7, pp. 687-704.

[6] B.L.WORSNOP, B.Sc., Ph.D.APPLICATIONS OF THERMOELECTRICITY Methuen’s Monographs On Physical Subjects, pp 3-109

[7] Rowe, D.M., “**CRC Handbook of Thermoelec-tric**” , New York, CRC Press,1995.

[8] Anders Killander, John C. Bass, 1996,“**A Stove-Top Generator For Cold Areas**” *IEEE 15th International Conference on Thermoelectric*, pp.390-393

[9] Yuri Gurevich, Georgiy Logvinov and Igor Volovichev, “ **Nonequilibrium Carriers of** Charge in Thery of Thermoelectric Phenomena”, *Proceedings of the 22nd* International Conference on Thermoelectrics, pp.464-467.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[10] คณิต พิมพ์คำไหล,บุญยัง ปลั่งกลาง, "**การวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D**" การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8,2-4 พฤษภาคม 2555

[11] คณิต พิมพ์คำไหล,บุญยัง ปลั่งกลาง, "**การวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulik**"การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6,13 – 15 พฤศจิกายน 2556

[12] Rida Y.Nuwayhid, Alan Shinhadeh, Nesreen Ghaddar. "**Develelopment and testing of a domestics woodstove thermoelectric Generator with natural convection cooling**", Energy Conversion & Management, Vol. xx, No. x, pp. xxx-xxx., 2004.

[13] Jorge Vázquez, Miguel A. Sanz-Bobi, Rafael Palacios, *Antonio Arenas, "**State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles**" *Proceedings of the 7th European Workshop on Thermoelectrics*, Paper #17, Oct 2002, Pamplona, SPAIN.

[14] วนิดา เอกบูรณะวัฒน์ เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ และอิษฎา บุญญาอรุณเนตร "**ระบบประจุแบตเตอรี่แบบใช้พลังงานจากเทอร์โมอิเล็คตริก**" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON 27) โรงแรมโซฟิเทลราชาออคิด จังหวัดขอนแก่น วันที่ 29 – 30 ตุลาคม 2547

[15] แสงดาว สังข์แก้ว,ปิ่นอนงค์ แก้วมณีและสมภพ จิรเจษฎา(2546), "**การศึกษาพฤติกรรมและการประยุกต์ใช้ งานเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์**" ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[16] Lersatitthanakom C., J.Hirunlabh,J. Khedari and M.Daguenet (2002) "**Experimental Performance of a Celling – Type Free Convected Air Conditioner**"Inter.J.Ambient Energy,23,pp.59-68

[17] Mahudur R,Roger S. "**Thermoelectric power-generation for battery charging**" In:Proceeding of the IEEE conference on energy management and power delivery,vol.1;1995.p.186-91

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[18] Roth W,et al. “**Grid-independent power-supply for repeaters in mobile radio networks using photovoltaic/ thermoelectric hybrid systems**”In:Proceeding of the 16th international conference on thermoelectrics;1977.p.582-5.

[19] Min G,Rowe DM. “**Peltier devices as generators.CRC handbook of thermoelectric**” London:CRC Press;1995[Chapter 38].

[20] Rowe DM,Min G. “**Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation**” IEE Proc-Sci Meas Technol 1996;143(6):351-6

[21] Eakburanawat J,Khedari J,Hirunlabh J,Daguenet M,Maneewan S,Teekasap S. “**Solar-biomass thermoelectric power generation simulation**”In:Proceeding of 22nd international conference on thermoelectrics,La Grande Motte,Montpellier,France;2003.

[22] Chung Henry Shu-Hung,Tse KK,Ron Hui SY,Mok CM,Ho MT“**A novel maximum power point trackingtechnique for solar panels using SEPIC or Cuk converter**”IEEE Trans Power Electron 2003;18(3):717-24.

[23] Koutroulis Eftichios,Kalaitzakis Kostas,Voulgaris NC“**Development of a microcontroller-based,photovoltaic maximum power point tracking control system**”IEEE Trans Power Electron 2003;16(1):717-24.46-54.

[24] เจริญพร เลิศสถิตธนกร,ณัฐวุฒิ สุวรรณทา“**การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของตะเกียงโดยใช้เทอร์โมอิเลคตริค”, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม;2545**

[25] วันชัย ทรัพย์สิงห์, เอกสารประกอบการสอน,“**อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการควบคุม”,** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี;2553

[26] ภาณุพงศ์ ศิริกุล,วิทยานิพนธ์, “**การทดสอบวิเคราะห์ระบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเพลเทียร์”,**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี;2553

[27] " Thermoelectric module.".[ออนไลน์].เข้าถึงได้ จาก: http://www.novatecproducts.com/

รายการอ้างอิง (ต่อ)

about_thermoelectric_technology.htm.2554

[28] "Electric Power Generated from Waste Heat.". [Online]. Available: http://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2005/20050617/20050617.html.2013

[29] Jorge Vázquez, Miguel A. Sanz-Bobi, Rafael Palacios, *Antonio Arenas, "**State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles**" *Proceedings of the 7th European Workshop on Thermoelectrics*, Paper #17, Oct 2002, Pamplona, SPAIN.

[30] G.S. Nolas,J. Sharp,J. Goldsmid,Thermoelectrics, "**Basic Principles and New Materials Developments**",Springer Science & Business Media, March 9, 2013

[31] ***A F Ioffe*****,"Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling**", London : Infosearch, ©1957

[32] C. Wood, "**Materials for thermoelectric energy conversion**", Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, U.S.A. : Available online 5 August 2003

[33] " การจำแนกความร้อนเหลือทิ้ง.".[ออนไลน์].เข้าถึงได้ จาก: http://www.spowerteam.co.th/index.php/article/energy-articles/151-classification-of-waste-heat.html,กันยายน 2557

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การใช้งานโปรแกรม Matlab/Simulink

โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

โปรแกรม Matlab หรือ Matrix Laboratory ได้เริ่มพัฒนาครั้งแรกโดย Dr. Cleve Molor ซึ่งเขียนโปรแกรมนี้ขึ้นมาด้วยภาษา Fortran โดยโปรแกรมนี้ได้พัฒนาภายใต้โครงการ LINPACK และ EISPACK Matlab เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาสำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณเวกเตอร์และเมทริกซ์ทั้งในระบบจำนวนจริงและระบบจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งเป็นการเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับการใช้งานในการคำนวณวิเคราะห์และออกแบบระบบ (System Design) ในทางวิศวกรรมทุกสาขา

Matlab เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงใช้ในการคำนวณทางเทคนิค Matlab ได้รวมการคำนวณ การเขียนโปรแกรม และการแสดงผลรวมกันอยู่ในตัวโปรแกรมเดียวไดอ้ย่างมีประสิทธิภาพ และอยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็จะเหมือนการเขียนสมการคณิตศาสตร์งานที่ใช้ Matlab ก็เช่น การคำนวณทั่วไป การสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์ข้อมูล การแสดงผลในรูปกราฟแบบทั่วไปและกราฟทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสามารถสร้างโปรแกรมในลักษณะที่ติดต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก

การทำงานของ Matlab จะสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง (Interactive) คือการเขียนคำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้ Matlab ประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถที่จะรวบรวมชุดคำสั่งเหล่านั้นเป็นโปรแกรมก็ได้ ข้อสำคัญอย่างหนึ่งของ Matlab คือข้อมูลทุกตัวจะถูกเก็บในลักษณะของ array โดยในแต่ละตัวแปรจะไดรับการแบ่งเป็นส่วนย่อยเล็กๆ ขึ้น (หรือจะไดรับการแบ่งเป็น element นั่นเอง) ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็น array ใน Matlab นี้เราไม่จำเป็นที่จะต้องจอง dimension เหมือนกับการเขียนโปรแกรมในภาษาทั่วๆไป ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแก้ปัญหาของตัวแปร ที่อยู่ในลักษณะ เวกเตอร์และเมทริกซ์ได้โดยง่าย ทำให้ลดเวลาการทำงานลงได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมโดย C หรือ Fortran นอกเหนือจากตัวโปรแกรม Matlab เองแล้ว บริษัท Math Works ผู้ผลิต Matlab ยังได้ผลิตเครื่องมือที่เรียกว่า Toolbox หรือ Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อประกอบกับการใช้ Matlab สำหรับงานที่จำเพาะเจาะจงหลายประเภท Simulink นั้น เป็นการนำเอาโปรแกรมที่เขียนขึ้นเป็นฟังก์ชั่น

สำหรับ Matlab เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการเรียกใช้มากขึ้น ทำให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นที่จะต้องสร้างโปรแกรมขึ้นมาใช้งานเองโดย Simulink ที่สร้างขึ้นจะครอบคลุมการทำงานด้านต่างๆ มากมาย ลำดับการคำนวณหรืออัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาเขียนเป็น

ฟังก์ชันที่ต้องมีการผ่านค่าตัวแปรเข้าออกจากฟังก์ชันหรือโปรแกรมที่ไม่ต้องผ่านค่าตัวแปรเข้าออกของผู้ใช้เองเรียกว่า m file Matlab สามารถที่จะทำการคำนวณตามลำดับ (Sequential Execution) ในโปรแกรม m file ที่ผู้ใช้เขียนขึ้นและ m file เหล่านี้ ก็อาจจะถูกมองเป็นฟังก์ชันจากโปรแกรมอื่นๆ อีก ซึ่งการผ่านค่าเข้าออกฟังก์ชัน ในโปรแกรม Matlab มีความสะดวกเรียนรู้ได้ง่ายกว่าการใช้ภาษาคอมพิวเตอร์อื่นในการเขียนและเนื่องจากฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ก็มีอยู่พร้อมแล้วเป็นจำนวนมาก ทำให้การเขียนโปรแกรมด้วย Matlab เป็นไปด้วยความรวดเร็ว

การอ่านและเก็บ (Read and Write) ค่าตัวแปรก็สามารถทำไดทั้งในรูปแบบของ Matlab (Binary and File) หรือ ASCII File ก็ได้ทำให้การเชื่อมต่อ (Interface) ทางข้อมูลระหว่าง Matlab กับโปรแกรมอื่นเป็นไปโดยง่าย

1. การเริ่มต้นใช้งาน

เมื่อเข้ามาที่หน้าต่างโปรแกรม Matlab จะเจอหน้าต่างคำสั่งเป็นหน้าต่างแรกที่พบ เมื่อเปิดโปรแกรม Matlab การป้อนคำสั่งต่างๆ จะป้อนลงในหน้าต่างนั้นเพื่อทำการคำนวณและประมวลผลต่างๆ และเป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงผลที่ได้จากการประมวลผลยกเว้นรูปกราฟซึ่งจะแยกไปแสดงผลในหน้าต่างกราฟ ในการป้อนคำสั่งสำหรับการประมวลผลของโปรแกรม Matlab สามารถป้อนได้ 2 วิธีด้วยกันคือเป็นการป้อนคำสั่งหรือค่าตัวแปรต่างๆ บนหน้าต่างคำสั่งทีละคำสั่งตามขั้นตอนของการแก้ปัญหา หรือเป็นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และชุดคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ทำการประมวลผลตามขั้นตอนของการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาลงในไฟล์ซึ่งจะตอ้งเก็บไว้ด้วยนามสกุล .m โดยที่จะเรียกชุดตัวแปรและชุดคำสั่งทั้งหมดที่เขียนในลักษณะนี้ว่าโปรแกรม .m file

สำหรับผู้ที่ใช้โปรแกรมคำสั่ง Matlab ครั้งแรกโปรแกรม Matlab มีคำสั่งซึ่งช่วยดูลักษณะการใช้งานและความสามารถในการทำงานของโปรแกรม Matlab และคำสั่ง Computer ซึ่งจะแสดงชนิดของเครื่อง Computer ที่เรากำลังใช้งานอยู่ในขณะนั้นนอกจากนั้นยังมีคำสั่ง Help ซึ่งจะอธิบายการใชคำสั่งต่างๆ รวมถึงรูปแบบคำสั่งที่มีใช้ในโปรแกรม Matlab สัญลักษณ์หนึ่งตัวที่ใช้บ่อยในโปรแกรม Matlab คือ % สัญลักษณ์ % เมื่อเป็นตัวแรกของคำสั่งหรือข้อความใดๆ จะเป็นเครื่องหมายที่บอกให้เครื่องทราบว่าไม่ต้องทำการประมวลผลใดๆ ต่อคำสั่งหรือขอ้ความที่อยู่หลังเครื่องหมายนี้ วัตถุประสงค์ของการใช้เครื่องหมายนี้ ก็เพื่อเป็นการเขียนคำอธิบายโปรแกรมในคำสั่งของบรรทัดต่อๆไป ที่เราได้เขียนไว้ทั้งนี้เป็นการเตือนความจำของเราเองถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหรือผู้ที่จะนำโปรแกรมไปใช้ให้เข้าใจถึงตัวโปรแกรมที่เราเขียนนั้นหรือเรียกว่า Script file ซึ่งหมายถึงไฟล์ที่ถูกเก็บในรูปของรหัส ASCII

Code โดย m file หรือ Script file นี้สามารถสร้างมาจากโปรแกรม Editor ใดๆ หรือโปรแกรม Word Processor ใดๆ ก็ได้ในการเรียกใช้โปรแกรม m-file นี้ สามารถทำได้อย่างง่าย โดยเพียงแต่พิมพ์ชื่อของ m file โดยไม่ต้องตามด้วยนามสกุล .m ลงในหน้าต่างคำสั่ง โปรแกรม Matlab ก็จะไปทำการอ่านคำสั่งใน m file ชื่อนั้นๆ และทำการประมวลผลไปทีละบรรทัดจนจบโปรแกรม

2. การคำนวณพื้นฐาน

เมื่อพิมพ์คำสั่งการคำนวณที่เครื่องหมาย “>>” Matlab จะทำการคำนวณแล้วจะแสดงผลคำตอบได้ทันทีแบบเดียวกับเครื่องคิดเลข สมมติว่าต้องการคำนวณ 25+90 สามารถพิมพ์เข้าไปได้ทันทีดังนี้ >> 25+90 แล้วกด Enter ซึ่ง Matlab จะตอบออกมาทันทีในบรรทัดถัดมาว่า ans = 115 ดังภาพที่ ก.1

ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะการเขียนประโยคคณิตศาสตร์จะเหมือนกับการเขียนภาษาสูงทั่วไป โดยจะกระทำในวงเล็บก่อนแล้วค่อยทำข้างนอก

ภาพที่ ก.1 ผลที่ได้จากการคำนวณใน Matlab

3. เมทริกซ์

โปรแกรม Matlab มีการใช้ฟังก์ชั่นหลายๆ ตัวเพื่อสร้างเมทริกซ์พิเศษขึ้น โดยเมทริกซ์เหล่านี้อาจมีการใช้เฉพาะงาน หรืออาจใช้ในการคำนวณตามเทคนิคการคำนวณต่างๆ โดยส่วนมากเมทริกซ์เหล่านี้ มักตั้งขึ้นใกล้เคียงกับการทำงานของเมทริกซ์นั้นๆ การป้อนค่าให้กับสมาชิกในเมทริกซ์

สามารถทำได้โดยสมาชิกในหนึ่งแถวจะแบ่งด้วยการเว้นวรรค (Space) แต่ละแถวจะแบ่งด้วยเครื่องหมาย “ ; ” (Semicolon) หรือด้วยการกด Enter เช่น

>> F = [3 5 7 ; 11 17 18]; Enter

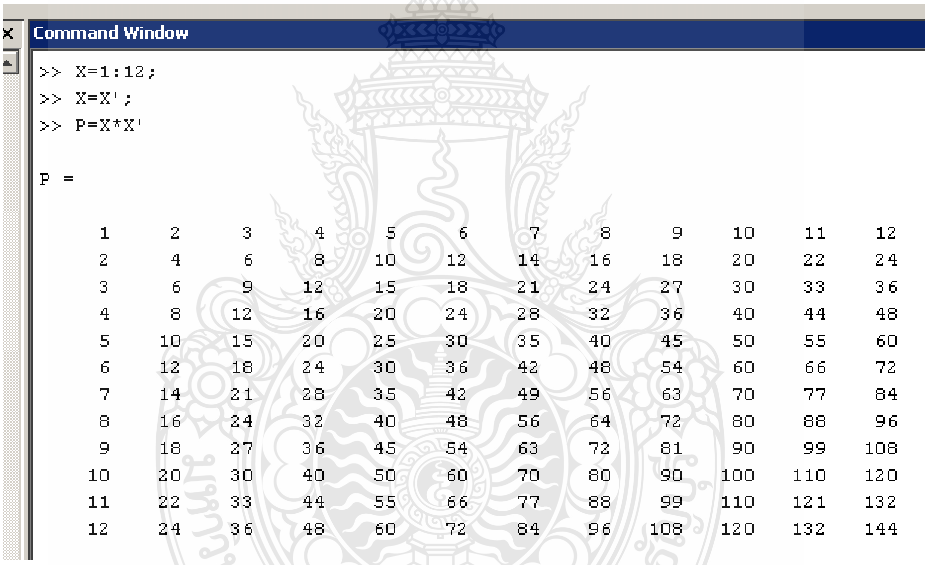
ตัวอย่างเช่น ต้องการทำตารางสูตรคูณ ในการคิดคือ ให้มองตารางสูตรคูณเป็นเมทริกซ์เกิดจาก

$P = XX^T$ เมื่อ X เป็นเวกเตอร์หลัก (Column Vector) ดังนั้นสร้างเวกเตอร์ขึ้นมาหนึ่งเวกเตอร์ มีค่าจาก 1 ถึง 12 โดยใชคำสั่งคือ

>>X=1:12; Enter

>>X=X$^{/}$; Enter

>>P=X*X$^{/}$ Enter



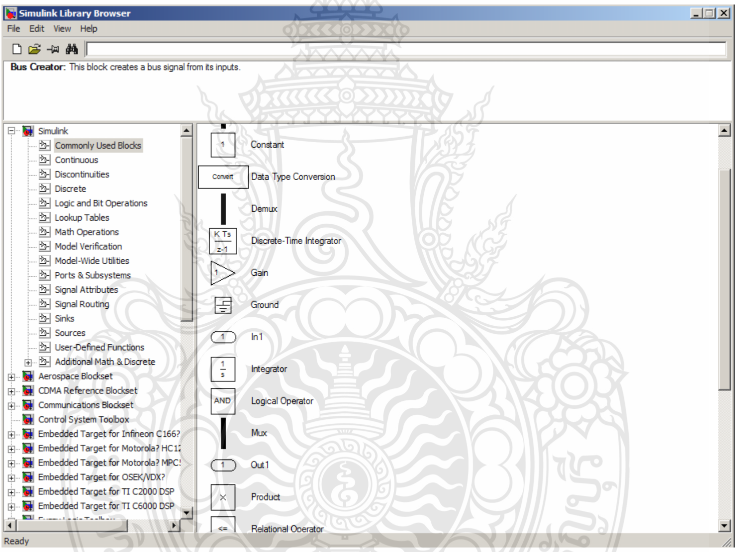
ภาพที่ ก.2 ตารางสูตรคูณแม่ 2 ถึงแม่ 12

4. SIMULINK เบื้องต้น

โปรแกรม Matlab สามารถจำลองทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลา ได้โดยการใช้ Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือ Toolbox ที่อยู่ในโปรแกรม Matlab โดยจะทำงานภายใต้หน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อทางรูปภาพ (GUI) ของ Simulink เท่านั้น คำว่า Simulink มาจากคำสองคำคือ Simulation และ Link การใช้งาน Simulink จะกระทำโดยการนำ Block ในหน้าต่าง

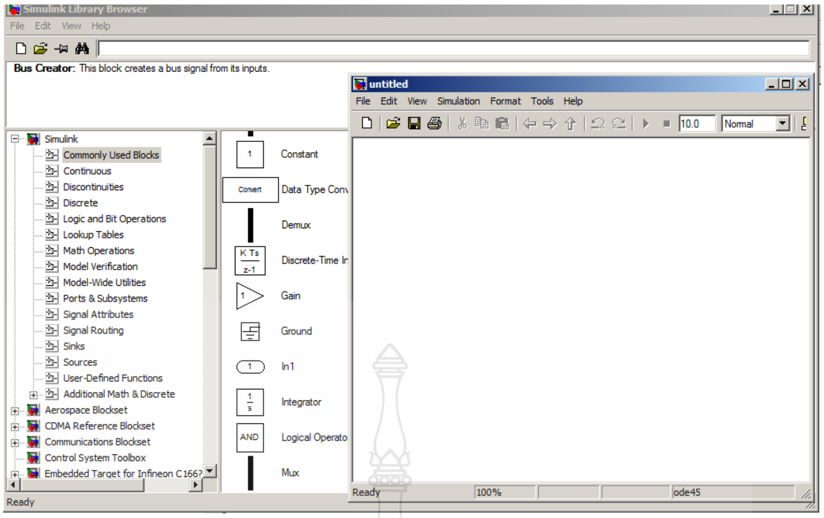
Library-Simulink มาต่อกันตามที่เราต้องการและสามารถจำลองระบบได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้น ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องการจำลองระบบสามารถกระทำได้โดยป้อนอินพุตที่ป้อนเข้าไป

โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ,การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ ,การใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์รูปแบบต่างๆเป็นต้น ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบของ block Diagram เป็นหลักทำให้มีความง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้ Building Blocks ที่มีมาให้จาก Simulink Library Browser ดังภาพที่ ก.3

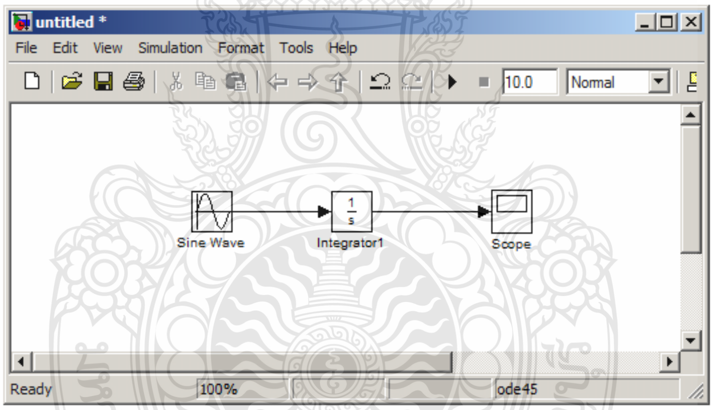


ภาพที่ ก.3 Block Diagram พื้นฐานใน Simulink Library Browser

ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ และส่งผ่านสัญญาณ ข้อมูลจาก block หนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีก block หนึ่งโดยจะผ่านเส้นเชื่อมต่อระหว่างกัน โดยที่สามารถดูผลลัพธ์ของข้อมูลได้หลายลักษณะทั้ง Oscilloscope หรือ Display โดยสามารถเลือกจากในส่วนของ Sink ดังภาพที่ ก.4 และ ก.5



ภาพที่ ก.4 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink



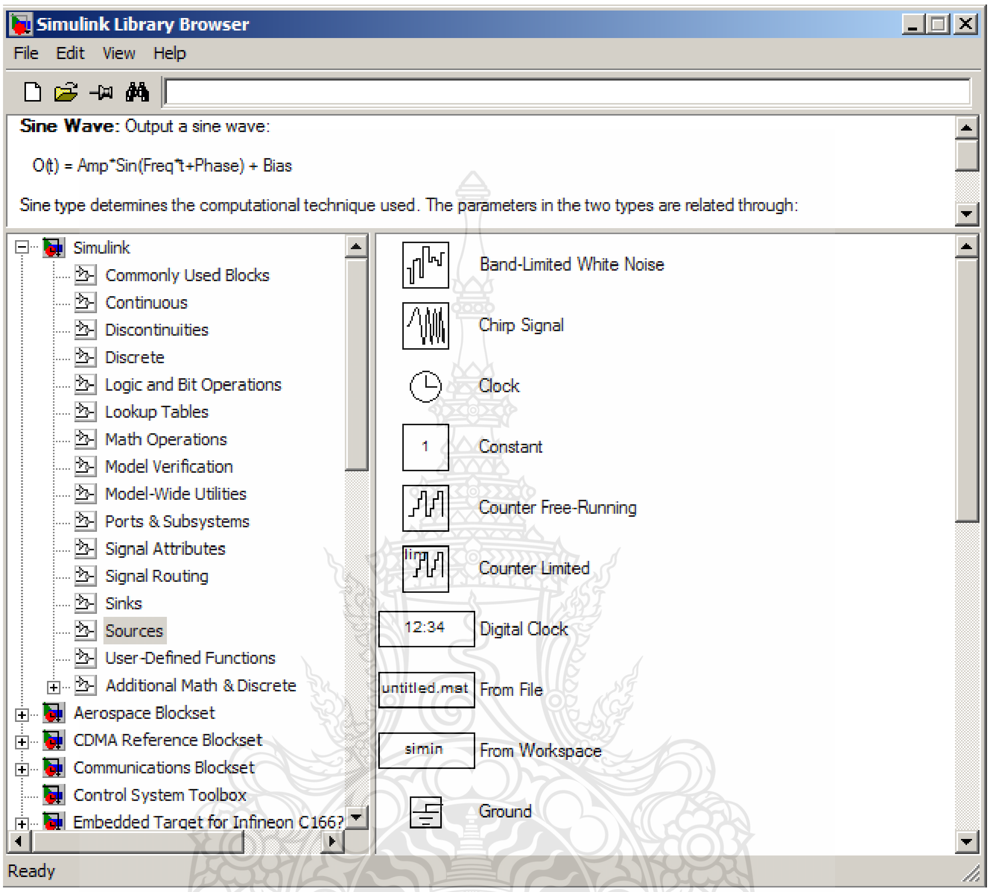
ภาพที่ ก.5 การเชื่อมต่อระหว่าง block ของ Simulink

5. กลุ่มของ block พื้นฐานใน Simulink

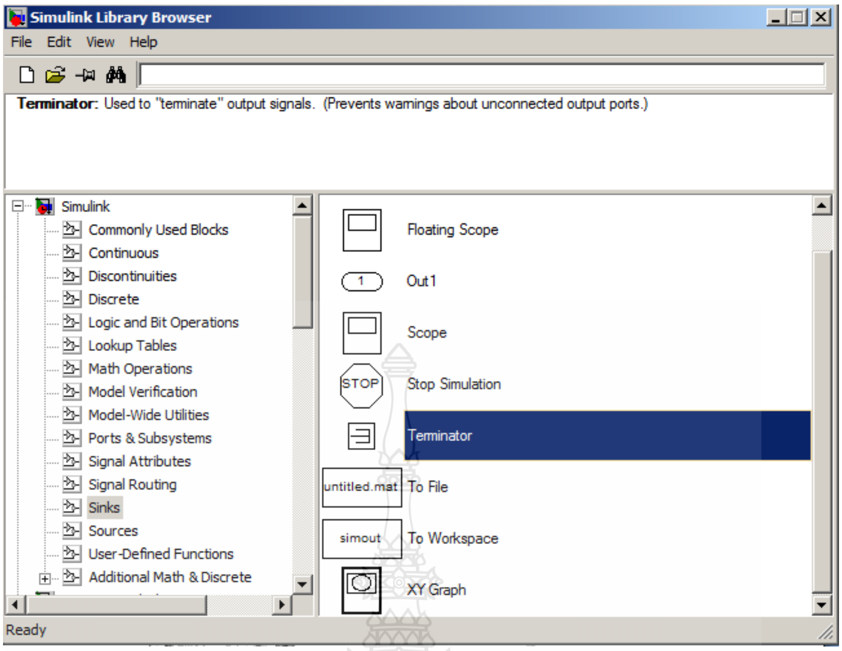
ก. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และแหล่งแสดงสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มของ Source ที่กำหนดมาให้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant), แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator), แหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักใช้เพื่อจับเวลาการจำลองปัญหา

เป็นต้น ดังภาพที่ 2.28 กลุ่มของ Sinks เป็นกลุ่มที่จะใช้สำหรับเก็บข้อมูล (To Workspace) และแสดงผลของการแก้ปัญหา (Scope ,Display) เป็นต้น ดังภาพที่ ก.6



ภาพที่ ก.6 กลุ่ม block ของ Source



ภาพที่ ก.7 กลุ่ม block ของ Sinks

จากภาพที่ 6.7 กลุ่มของ Sinks มีดังนี้

Scope คือ การแสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองระบบบนออสซิลโลสโคป

To Workspace คือ เก็บค่าข้อมูลไว้ใน Workspace

Stop Simulation คือ หยุดการจำลองระบบเมื่อค่าอินพุตมีความแตกต่างจากศูนย์

Display คือ การแสดงค่าข้อมูลบน Block

ข. การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่ม Math Operations มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการคณิตศาสตร์ต่างๆ มีดังนี้

Sum คือ การรวมผลรวมอินพุต

☐ Product คือ การหาค่า Dot Product ของเวกเตอร์อินพุต

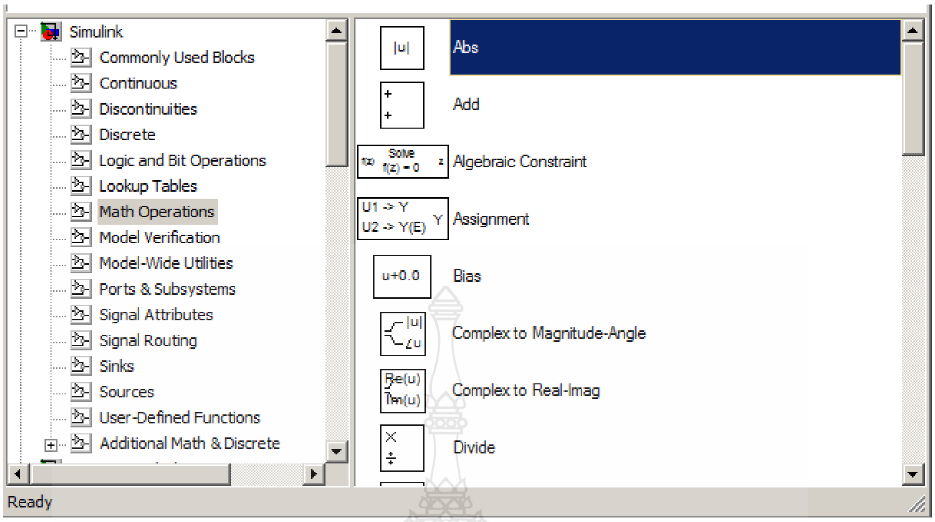
☐ Gain คือ การคูณอินพุตด้วยค่าคงที่ (Gain) ที่กำหนด

☐ Abs คือ การหาค่า Absolute ของอินพุต

☐ Math Function คือ การหาค่าฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์ของอินพุต

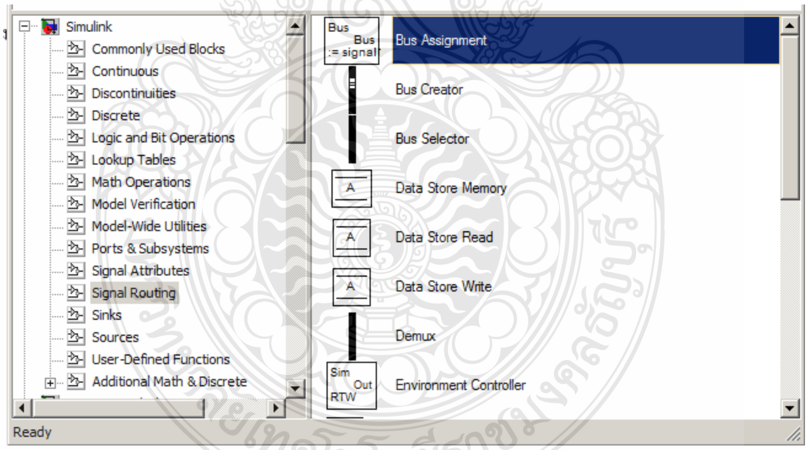
Trigonometric Function คือ การหาฟังก์ชั่นตรีโกณมิติของอินพุต

☐ Rounding Function คือการหาฟังก์ชั่นการปัดเศษของอินพุต



ภาพที่ ก.8 กลุ่ม block ของ Math Operations

ค. ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)



ภาพที่ ก.9 กลุ่ม block ของ Signal Routing

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นต้องมีการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่ง block ในกลุ่มนี้เป็นประเภท GOTO, FROM, Multiplexing จะทำให้แผนภูมิมีความเป็นระเบียบมากขึ้น

ง. Continuous

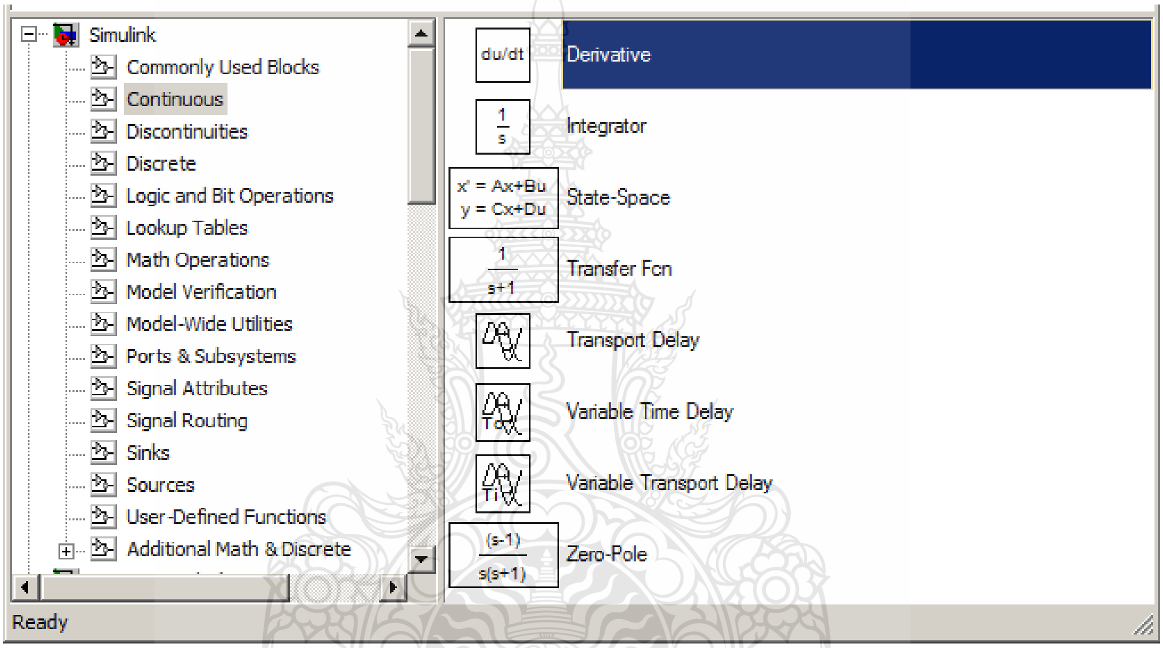
จะประกอบด้วยกลุ่ม block ที่ใช้อธิบายฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนี้

Integrator คือ การอินทิเกรตสัญญาณ

□ Derivative คือ การหาอนุพันธ์ในเชิงเวลาของสัญญาณ

□ State-Space คือ การสร้างระบบ Line-Time Invariant ในรูปแบบ State-Space

□ Zero-Pole คือ การสร้าง Transfer Function ในรูปแบบ Zero-Pole



ภาพที่ ก.10 กลุ่ม block ของ Continuous

จ. Discrete

จะประกอบด้วยกลุ่ม block ที่ใช้จำลองระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังนี้

Zero-Order Hold คือการสร้างฟังก์ชัน Sample-and-Hold

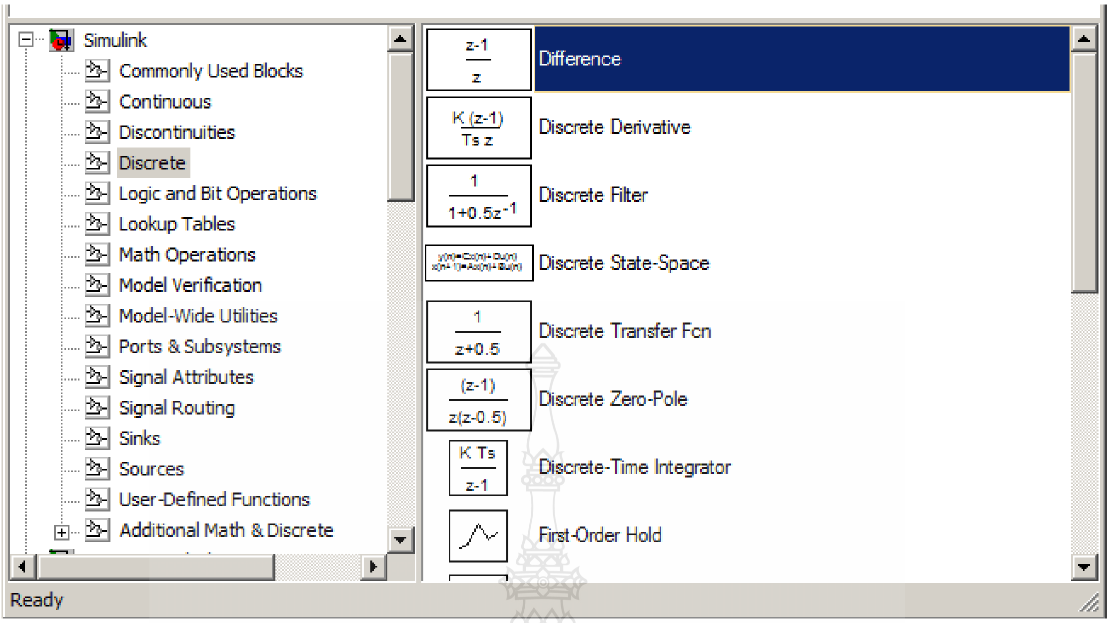
□ Unit Delay คือ การ Delay อินพุตไปหนึ่งคาบตัวอย่าง

□ Discrete-Time Integrator คือ การสร้างอินทิเกรท Discrete-Time

□ Discrete State-Space คือ การสร้างระบบ Discrete-Time ในรูปแบบ State-Space

□ Discrete Transfer Fcn คือ การสร้าง Discrete-Time Transfer Function

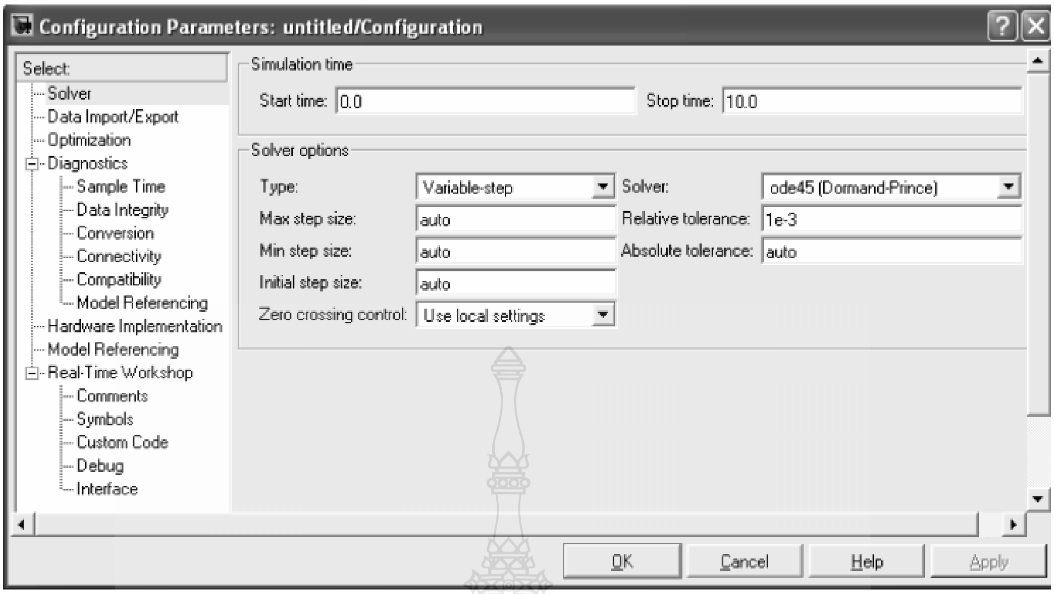
□ Discrete Zero-Pole คือ การสร้าง Discrete-Time Transfer Function ในรูป Zero-Pole



ภาพที่ ก.11 กลุ่ม block ของ Discrete

6. การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาในคอมพิวเตอร์นั้น มีข้อสังเกตที่ต้องพึงระวัง คือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาในการจำลองปัญหา เช่นคอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที ทำให้ระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจไม่ตรงกันในการจำลองปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าไม่คงที่ (Variable Step Size) ค่า Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าคงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ ดังภาพที่ ก.12



ภาพที่ ก.12 หน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

ภาคผนวก ข

m-files โปรแกรม Matlab/Simulink

```
Alfa= 0.045;
DT= 190 ;
ri= 0.35 ;
t_min=0;
t_max=10;

figure(1);
subplot(3,1,1);
plot(t,Vload,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('R [ohm]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 10]);

subplot(3,1,2);
plot(t,I,'red','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Amp','FontSize',18);
xlabel('R [ohm]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 10]);

subplot(3,1,3);
plot(t,P,'black','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Power','FontSize',18);
xlabel('R [ohm]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 50]);
```

```
figure(2);
subplot(3,1,1);
plot(t,Vp1,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

subplot(3,1,2);
plot(t,Vp2,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

subplot(3,1,3);
plot(t,Vp3,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

figure(3);
subplot(3,1,1);
plot(t,Vp4,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);
```

```
subplot(3,1,2);
plot(t,Vp5,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

subplot(3,1,3);
plot(t,Vp6,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

figure(4);
subplot(3,1,1);
plot(t,Vp7,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);

subplot(3,1,2);
plot(t,Vp8,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);
```

```
subplot(3,1,3);
plot(t,Vp9,'blue','LineWidth',3);
grid on;
ylabel('Volts','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max 0 2]);
```

ภาคผนวก ค

เอกสารข้อมูลของเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูล

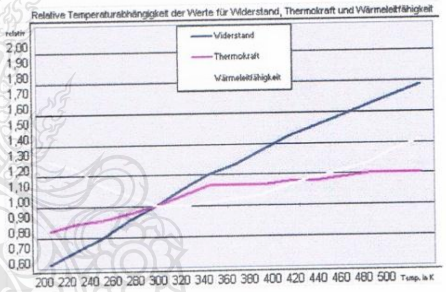
thermalforce.de Lychener Str. 73, 10437 Berlin, Germany, Tel: ++49+30+44650591

THERMO ELECTRICAL GENERATOR

TEG 127-250-37 **Angaben bei ΔT = 230K** T_{hot} = 250°C und T_{cold} = 20°C

Maße dimensions L x B x H	U leer open circuit voltage	U last u load	ρ R bei 300 K resistance at 300 K	R kr resistance corrected	I Kurzschl. short circuit current	I last I load	Leistung W el. power	Thermokraft, Seebeckkoeff V/K thermalforce at 300 K	V/K kr thermforce corrected	Wärmeleitwe W/K thermal conduct.	Wärmewiders K/W thermal resistance	Wirkungsgrad efficiency	aufgen. Wärme heat flow hot side	abzuführende Wärme heat flow cold side
mm	V	V	Ω	Ω	A	A	W	α	α	κ	Rth	η	Qw	Qk
	10,886	5,443	0,800	1,352	8,051	4,026	21,911	0,045	0,050	1,900	0,526	4,207	-520,8	501,1
Angaben bei ΔT = 200K T_{hot} = 220°C und T_{cold} = 20°C														
50x50x4,3	9,675	4,838	0,800	1,280	7,559	3,779	18,282	0,045	0,052	1,900	0,526	4,021	-454,7	439,0
Angaben bei ΔT = 200K abzüglich Temperaturabfall durch die Keramikplatten (15 W/mK) und Wärmeleitpaste (8 W/mK) bei durchschnittl. therm. Anbindung														
	7,994	3,997	0,800	1,280	6,246	3,123	12,482	0,045	0,049	1,900	0,526	3,251	-384,0	372,5

Die Leistungsdaten gelten bei optimaler thermischer und elektrischer Anpassung und sind berechnet bei den angegebenen Werten für T_{hot} und T_{cold}. R kr und V/K kr geben den Temperaturkoeffizienten von Widerstand und Thermokraft bezogen auf die mittlere Temperatur zwischen T_{hot} und T_{cold} an. Die Leistungswerte in den ersten beiden Zeilen gelten für Temperaturen an den Thermocoupels. Die Leistungsangabe der letzten Zeile berücksichtigt den Temperaturabfall durch den Wärmewiderstand der Keramikplatte und des Wärmeleitmittels bei mittlerem Wärmeübergangskoeffizienten. Im obigen Beispiel ist ein Temperaturabfall von + 15 °C auf der Warm- und 15 °C auf der Kaltseite auszugleichen. The values of the last line consider the drop of temperature by the thermal resistance of the ceramic plates and the thermal compound. A drop of temperature of 15 °C on the warm side and 15 °C on the cold side is to be adjusted.



Mechanische Daten/mechanical data:

Anzahl/number of themocouples:	127
Material/material:	Bi_2Te_3
Höhentoleranz/height tolerance:	ΔH ± 0,25 mm
Längentoleranz/length tolerance:	0,2 mm
Gewicht/weight:	50 g
max. Temperatur/max. temperatures:	250 °C, kurzzeitig bis 260 °C
max. Scherkraft/max. shear force:	pro cm^2, 125 N
max. Vibration/max. vibration:	bis 55 Hz, 2 m/s^2
max. Zugkraft/ max. tension:	pro cm^2, 195 N
Keramik Platten/ceramic plates:	BK-96, Al_2O_3, 96 %
thermal conductivity of the ceramic:	15 W/mK, Höhe/height: 1 mm
Toleranz der thermischen und elektrischen Parameter:	± 6 %
tolerances of thermal and electric parameters:	± 6 %
Empfohlener Kühler/recommended cooler:	liquid cooler, Rth: 0,033 K/W

Einbau- und Anwendungshinweise/notes:

Die Rauhtiefe der Einbaufläche sollte mindestens RZ 10, die Planizität mindestens 0,01 mm betragen. Optimaler Anpressdruck: 2-4 kg/cm^2. Die mittlere Schichtdicke des Wärmeleitmittels sollte weniger als 20μm betragen. Mit den drei Werten: α = Thermokraft, ρ = Widerstand und κ = Wärmeleitfähigkeit ist der Thermogenerator in seiner Leistung vollständig beschrieben. Jedoch sind diese Größen temperaturabhängig und müssen mit Hilfe des oben stehenden Diagramms für jede absolute Temperatur einer speziellen Anwendung wie folgt korrigiert werden.
The purity of surface processing on which TEG is installed must be better than 0,01 mm. The pressing force must be not less than 2-4 kg/cm^2. The thickness of the thermal compound must be not less than 20μm. With the three values: α = thermalforce, ρ = el. resistance und κ = thermal conductivity the TEG is completely descriptive. The module parameters given above are valid for 300 K. As these parameters depend on the absolute temperature, they have to be corrected using the correction chart above and can be calculated as follows.

Die effektive Temperatur der Warmseite/eff. Temperatures warm side: $\tilde{T}_{hot} = T_{hot} - R_{th,hot} \cdot \dot{Q}_{hot}$ und der Kaltseite/cold side: $\tilde{T}_{cold} = T_{cold} + R_{th,cold} \cdot (\dot{Q}_{hot} - P)$

Die am Element auftretende Spannung/occurring voltage: $U = \alpha(\tilde{T}_{hot}) \cdot \tilde{T}_{hot} - \alpha(\tilde{T}_{cold}) \cdot \tilde{T}_{cold} - \bar{\rho} \cdot I$ Die Generatorleistung/el. power: $P = I^2 \cdot R$ oder: $P = U \cdot I$

Der mittlere elektrische Widerstand/el.resistance: $\bar{\rho} = \dfrac{\int_{\tilde{T}cold}^{\tilde{T}hot} \frac{\rho(T)}{\kappa(T)} \cdot dT}{\int_{\tilde{T}cold}^{\tilde{T}hot} \frac{1}{\kappa(T)} \cdot dT}$ Die mittlere Wärmeleitfähigkeit/thermal conduction: $\bar{\kappa} = \dfrac{\int_{\tilde{T}cold}^{\tilde{T}hot} \frac{1}{\kappa(T)} \cdot dT}{\int_{\tilde{T}cold}^{\tilde{T}hot} \frac{1}{\kappa(T)^2} \cdot dT}$

Die auf der heißen Seite aufgenommene Wärme berechnet sich/heat flow on hot side: $Q_{hot} = \frac{\bar{\rho}}{2} \cdot I^2 - \alpha \cdot I \cdot \tilde{T}_{hot} - \bar{\kappa} \cdot \Delta T$

Die auf der kalten Seite abgegebene Wärme beträgt/ heat flow on cold side : $Q_{cold} = \frac{\bar{\rho}}{2} \cdot I^2 + \alpha \cdot I \cdot \tilde{T}_{cold} + \bar{\kappa} \cdot \Delta T$

Der Wirkungsgrad berechnet sich/the efficiency: $\eta = \frac{N}{Q_{hot}} \cdot 100$ Die Güteziffer (nach Altenkirch)/figure of merit: $Z = \frac{\alpha\ 2 \cdot \sigma}{\kappa}$

T_{hot} : absolute Temperatur der Warmseite (Wärmequelle)/absolute temperature hot side
T_{cold} : absolute Temperatur der Kaltseite (Wärmesenke)/absolute temperature hot side
$R_{th,hot}$: thermischer Widerstand der Warmseite/thermal risistance hot side (der Keramikplatten, der Wärmeleitpaste etc.)/(ceramik plate, thermal compound, etc.)
$R_{th,k}$: thermischer Widerstand der Kaltseite/ thermal risistance cold side (der Keramikplatten, der Wärmeleitpaste etc.)/(ceramik plate, thermal compound, etc.)
$\tilde{T}_{hot}$: tatsächliche Temperatur der Warmseite/effektive temperature on the hot side
$\tilde{T}_{cold}$: tatsächliche Temperatur der Kaltseite/effektive temperature on the cold side
Q_{hot} : Wärmestrom über das Element/heat flow needed on the hot side

α(T): korrigierte Thermokraft/corrected thermal force
ρ(T): korrigierter Widerstand/corrected electric resistance
κ(T): korrigierte Wärmeleitfähigkeit/corrected thermal conduction
$\bar{\rho}$: effektiver el. Widerstand/ effective electric resistance
$\bar{\kappa}$: effektive Wärmeleitfähigkeit/effective thermal conduction
P : die vom Element abgegebene elektrische Leistung/el. power

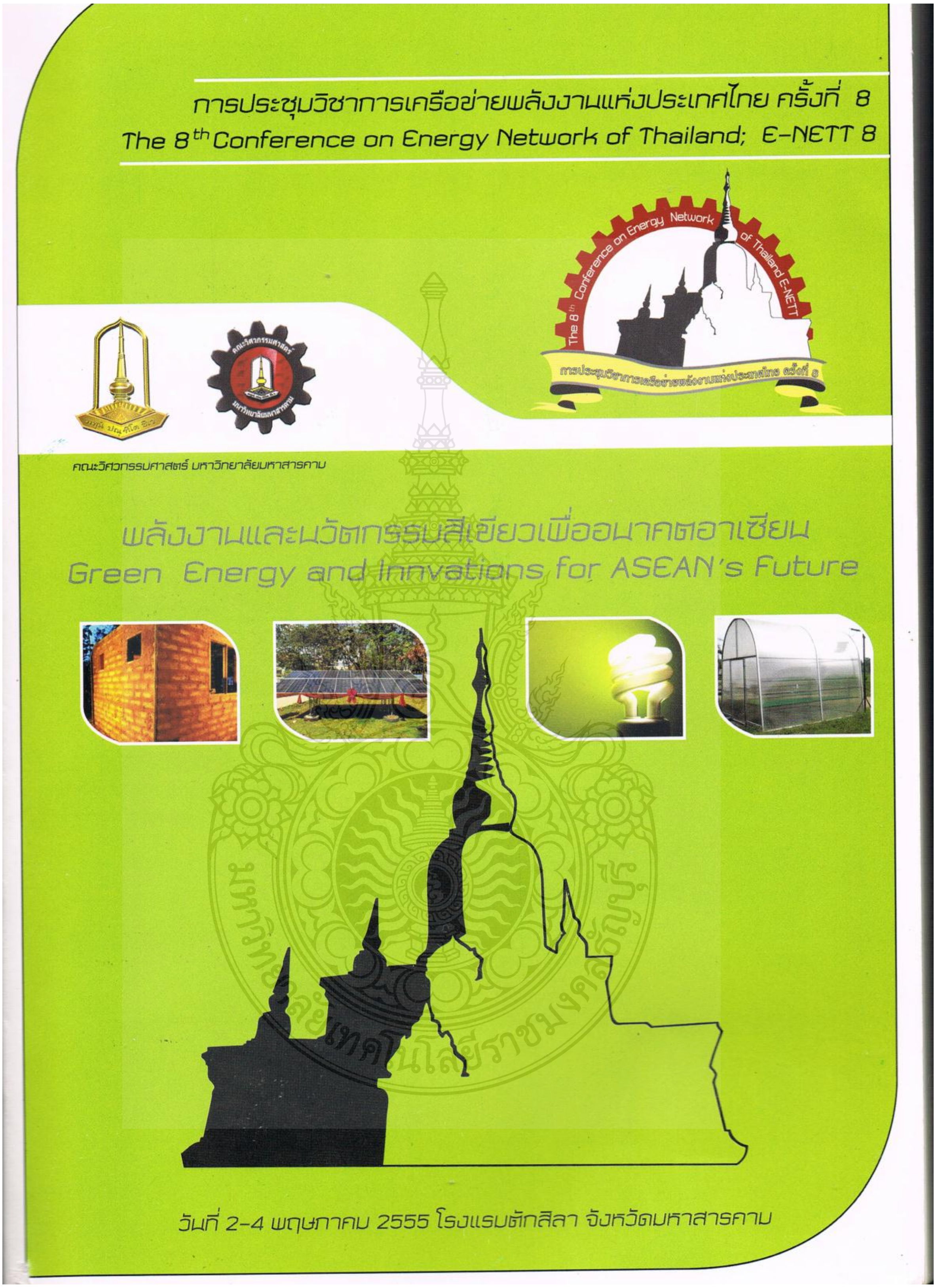
Der Wirkungsgrad steigt mit der Temperaturdifferenz ΔT und sinkt mit der mittleren Temperatur. Der Wirkungsgrad ist optimal, wenn der Widerstand des Verbrauchers dem Innenwiderstand des Generators entspricht. Die Farbkonvention der Anschlussdrähte ist der des Peltierbetriebs entgegengesetzt: schwarz = plus; rot = minus.
The efficiency is optimal with current consumer which complies with an ohm resistive load of effective electric resistance. Black wire = plus; red wire = minus. Handling a small device is much easier than handling of a big one. In many cases the use of two smaller TEG gives better results compared with only one big TEG. Please read the handling instructions for thermoelectric modules.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1.คณิต พิมพ์คำไหลและบุญยัง ปลั่งกลาง, "**การวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D**" การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, 2-4 พฤษภาคม 2555

2.คณิต พิมพ์คำไหลและบุญยัง ปลั่งกลาง, "**การวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulik**"การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6,13 – 15 พฤศจิกายน 2556

3. คณิต พิมพ์คำไหลและบุญยัง ปลั่งกลาง, "**ชุดชาร์จแบตเตอรี่จากพลังงานความร้อนสูญเปล่าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริค**"การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558


การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8
The 8th Conference on Energy Network of Thailand; E-NETT 8
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน
Green Energy and Innvations for ASEAN's Future
วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธิยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.ณัฏฐ์ กาศยปนันทน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. นรินทร์ วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. มานะ อมรกิจบำรุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวรากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. อดิศักดิ์ นาถกรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. เสริม จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร. จุฬาภรณ์ เบญจปิยะพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. นริส ประทินทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ปรีชา เติมสุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. จิรวรรณ เตียรถ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. สมบูรณ์ เวชกามา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. วันชัย ฉิมฉวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร. ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ศิริ ดวงพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. บพิธ บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์วรรณดี	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อดิศักดิ์ ปัตติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อุรโสภณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กันย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิดา เนียมนุ้ย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลาหวณิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิดา สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลกฤษณ์ จิตต์โต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาวัณย์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรอุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปรีชา ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วทัญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

สารบัญ (ต่อ)

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
AP15	การพัฒนาหัวฉีดแบบผสมอากาศก่อนการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊สต้นแบบ *สุวัชชัย กิจสำราญกุล และ จารุวัตร เจริญสุข*	117
AP16	การอบแห้งยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยลมร้อนและพลังงานแสงอาทิตย์ *เถลิงราช นิลเชื้อวงศ์, สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล*	118
AP17	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและลมร้อนสำหรับปลาหมึกสดและปลาหมึกต้ม *ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล และ สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล*	119
AP18	การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ไอน้ำร้อนความดันต่ำที่ใช้ในระบบอบแห้งสุญญากาศ *วรเชษฐ์ แสงสีดา, ธนรัฐ ศรีวีระกุล และ ชญานนท์ แสงมณี*	120
AP19	สภาวะของการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพการอบแห้งพริกไทยดำ *อัจฉรา แซ่โค้ว, สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล*	121
AP20	การวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D *คณิต พิมพ์คำไหล และ บุญยัง ปลั่งกลาง*	122
AP21	การลดระยะเวลาในการอบแห้งไม้โดยใช้อากาศอบแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ *อาทิตย์ เพียรงาม, นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ*	123
AP22	อิทธิพลของการอบแห้งของข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อสารต้านอนุมูลอิสระโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน *กฤตนัย แก้วยศ และ ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์*	124
AP23	อิทธิพลของการจัดวางครีบในเตาเผาแกลบฟลูอิไดซ์เบดต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ *ภัทรพันธ์ ทองยศ, สุริยา โชคเพิ่มพูน, ธีรพัฒน์ ชมภูคำ, ภาคภูมิ ศรีรมรื่น, ชินรักษ์ เธียรพงษ์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์*	125
AP24	อิทธิพลของครีบวางเอียงแบบเยื้องกันต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส *สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, สมพล สกุลหลง, ธีรพัฒน์ ชมภูคำ, สมิทธ์ เอี่ยมสอาด และ พงษ์เจต พรหมวงศ์*	126
AP25	การศึกษางานเชื่อมประสานท่อทองแดงด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน *จีระพงศ์ ศรีวิชัย และ นครินทร์ ศรีปัญญา*	127
AP26	การศึกษาสมรรถนะการระบายความร้อนเชิงเปรียบเทียบของท่อความร้อนที่ใช้อีเจ็คเตอร์ *เมธาสิทธิ์ โชคฤทัย, ธนรัฐ ศรีวีระกุล และ ณัฏฐ์ สุวรรณกูฏ*	128
AP27	อุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก *ปรัชญา มุขดา, พิเชฐ นิลดวงดี, อาทิตย์ ทับทิมหอม, อุทัย ผ่องรัศมี และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง*	129

การวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D

The Analysis of Thermoelectric Modules Connection TEG12750D

คณิต พิมพ์คำไหล และ บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ หาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 02-549-3420, 085-197-3903 โทรสาร: 02-549-3422 E-mail: kanitpim@hotmail.com, pboonyang@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์รูปแบบการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริคด้านร้อนเข้ากับแผ่นลวดความร้อนขนาด 1000 วัตต์และด้านทำความเย็นติดตั้งกับกล่องรับน้ำทิ้งของเครื่องปรับอากาศ นำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันในลักษณะขนานและอนุกรม ทำการปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จากผลการทดลองพบว่าการต่อโมดูลแบบอนุกรมจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อโหลดที่ต่ำกว่าการต่อโมดูลแบบขนาน ขณะที่การต่อโมดูลแบบขนานจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ดีกว่าการต่อโมดูลแบบอนุกรม เมื่อทำการเพิ่มโมดูลมากขึ้นผลการทดลองกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการต่อโมดูลแบบขนานจะมีค่าสูงกว่าการต่อโมดูลแบบอนุกรม

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริค, อนุกรม, ขนาน

Abstract

This article presents the investigation and analysis of multiple connections of Thermo Electric modules in order to find the best effective connection. To study the properties of the Thermo Electric modules, each module is constructed by installing the hot-side with heating rod 1000W and cooling-side with cooling water box. Thermo Electric module is connected together in parallel and series.By adjusting the load to investigate the output power, the result showed that the series connection has the power rate lower than the parallel connection. The parallel connection is taking the higher power output than the series connection. Therefore parallel connection is recommended for higher power circuit.

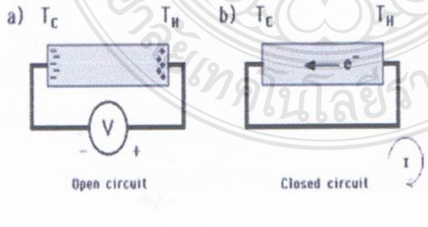
Keywords: Thermo Electric, serial, parallel.

1. บทนำ

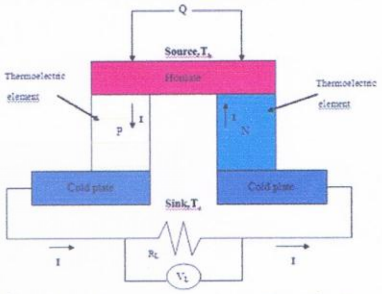
เทอร์โมอิเล็กทริคเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริคในเชิงควอนตัมฟิสิกส์เรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริคได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงก็จะถ่ายเทไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั้นคือมีอิเล็กตรอน (Electron) และ โฮล (Hole) เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้ไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างเครื่องทำความเย็นได้ การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์

โมอิเล็กทริคได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้งานประจำวัน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเตาหุงต้ม[1] แต่เนื่องจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ชนิด N และ P หลายตัว การนำไปใช้โมดูลเดียวจึงไม่เป็นปัญหา แต่เมื่อต้องการสร้างระบบให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นจำเป็นต้องใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลาย ๆโมดูลมาต่อร่วมกัน ความไม่เท่ากันในคุณสมบัติต่าง ๆของแต่ละโมดูล และอุณหภูมิที่แต่ละโมดูลได้รับ จะมีผลทำให้ขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมไม่เป็นไปอย่างที่คาดหวัง ในทางปฏิบัติสามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคที่คุณสมบัติเหมือนกันหมดหรือใกล้เคียงกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วผู้ใช้ไม่มีสิทธิ์ที่จะเลือกโมดูลมาทำการเชื่อมต่อได้ ซึ่งการได้มาของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค รุ่นเดียวกัน แต่ต่างกันที่ช่วงเวลาการผลิต รวมถึงความไม่สม่ำเสมอและคงที่ในกระบวนการผลิต ทำให้คุณสมบัติในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลแตกต่างกันออกไป เมื่อนำมาต่อร่วมกันย่อมทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมเปลี่ยนแปลงไป ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์วิธีการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในลักษณะที่แตกต่างกันที่ทำให้ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ ภายใต้สมมุติฐานความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติทางไฟฟ้าในแต่ละโมดูล

2.โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริค



รูปที่ 1 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริค

เทอร์โมอิเล็กทริคสร้างพลังงานไฟฟ้าจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังรอยต่อ P-N กับผนังอีกด้านของสาร P,N ดังรูปที่ 1 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่วนรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริค ค่าความต่างศักดิ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างผนังทั้งสองด้านนี้กระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck) เป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้า ความสำคัญทางกายภาพของมันสามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของพาหะไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ P และ N ก่อตัวเป็นอำนาจสนามไฟฟ้าภายในที่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิ สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$v = \alpha(\nabla T) \qquad (1)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารกึ่งตัวนำ T คือฟังก์ชันอุณหภูมิระหว่างผนังของเทอร์โมอิเล็กทริค และเมื่อพิจารณาถึงรายละเอียดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำทั้งสองขณะใช้งาน[2] พบว่า

$$v = -\left(\frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\alpha_n + \alpha_p}\right)\Delta T \qquad (2)$$

และค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นตามสมการ

$$r_i = \frac{2a}{(\sigma_n + \sigma_p)}\left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_n}\frac{1}{\xi acth\xi a + 2\tau Sa\xi^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ $\xi^{-1} = \sqrt{\frac{2\tau T_0}{e^2 n_0}\frac{\sigma_n \sigma_p}{(\sigma_n + \sigma_p)}}$ เป็น Diffusion ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ และ $\tau = \frac{1}{2\gamma_i n_0}$, โดยที่ γ_i คือ capture coefficient ในสารกึ่งตัวนำ n_0, p_0 คือปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารชนิด N , P α_n, α_p คือ ค่าสัมประสิทธิซีเบคในสาร N,P $\sigma_n = \rho_n \mu_n, \sigma_p = \rho_p \mu_p$ คือสภาพความนำไฟฟ้าของสาร N,P ρ_n, ρ_p คือความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P μ_n, μ_p คือสภาพความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P และ S คือพื้นผิวที่เกิด Recombination ซึ่งในกรณีที่มีกระแสไหลมากๆ แล้ว $(S \to \infty), (\tau \to 0)$ ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดรูปเป็นดังสมการ

$$r_i = \frac{2a}{\sigma_n + \sigma_p} \quad (4)$$

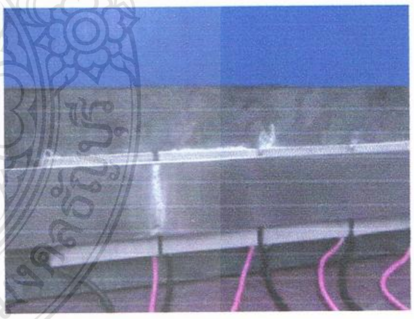
ความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตจะส่งผลให้เกิดปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ซึ่งผลดังกล่าวนี้ทำให้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆโมดูลมาเชื่อมต่อกัน ความแตกต่างเหล่านี้จะส่งผลถึงการด้อยประสิทธิภาพลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวม

3.การทดลองต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

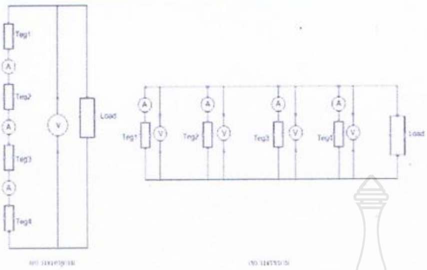
การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆโมดูลให้ทำงานร่วมกันสามารถทำได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบอนุกรม การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบขนาน และการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบผสม จากความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ทำให้การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในแต่ละแบบให้ประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลที่นำมาเชื่อมต่อกัน

4. การทดลอง

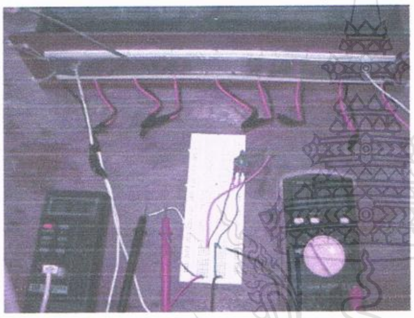
ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนจะใช้เทอร์โมอิเล็กทริคจำนวน 4 โมดูล ประกอบอยู่บนโครงสร้างระบบเดียวกัน โดยยึดติดผนังด้านร้อนของระบบด้วย ฮีทเตอร์ ขนาด 1000 วัตต์ และผนังด้านเย็นของระบบระบายความร้อนออกด้วยน้ำเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยในการทดลองจะทำการทดสอบคุณสมบัติความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล และทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ทั้งในลักษณะการขนานและการอนุกรม โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 3 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน



รูปที่ 4 วงจรการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค



รูปที่ 5 การวัดค่าการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

5. ผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติของแต่ละโมดูล

จากข้อสมมุติฐานดังที่กล่าวข้างต้นจำเป็นต้องเก็บข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของแต่ละโมดูลไว้เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์ ได้ผลการทดสอบในตาราง ที่ 1 - 4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโมดูลที่1 (ริมซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	13.20	9.52	8.89	8.28	7.78	6.82	6.07
แรงดัน (V)	1.06	1.08	0.71	1.09	1.04	0.98	1.08
กำลังไฟฟ้า(mW)	13.99	10.28	6.31	9.03	8.09	6.68	6.56

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 2 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.50	19.36	15.64	14.92	12.98	10.58	8.10
แรงดัน (V)	0.84	1.05	0.75	1.38	1.42	0.98	1.23
กำลังไฟฟ้า(mW)	19.74	20.33	11.73	20.59	18.43	10.37	9.96

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวที่ 3 จากซ้าย) ที่ T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.08	18.46	15.98	13.68	11.63	10.02	7.67
แรงดัน (V)	0.96	1.00	0.64	0.96	1.32	1.23	1.13
กำลังไฟฟ้า(mW)	22.16	18.46	10.23	13.13	15.35	12.32	8.67

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของโมดูลที่2 (ตัวริมขวา) ที T_h=190 °C , T_c= 10 °C

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	23.26	21.98	17.86	14.57	10.53	9.07	6.43
แรงดัน (V)	1.20	1.55	1.20	1.34	1.36	1.28	1.18
กำลังไฟฟ้า(mW)	27.91	34.07	21.43	19.52	14.32	11.61	7.59

จากการทดลองโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล จะเห็นว่าภายใต้การรับความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเราทำการเพิ่มโหลด จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลง เนื่องด้วยความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตจะส่งผลให้เกิดปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ทำให้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมส่งผลถึงการด้อยประสิทธิภาพลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวม โมดูลที่4 ให้กำลังไฟฟ้าออกได้ดีที่สุด ขณะที่โมดูลที่ 2 และ 3 ให้กำลังไฟฟ้าที่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนโมดูลที่ 1 จะให้กำลังไฟฟ้าได้ดีต่ำที่สุด

5.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล มาต่อร่วมกันแบบอนุกรมโดยเพิ่มจำนวนโมดูลเชื่อมต่อทีละโมดูล จากการทดลองตามตารางที่ 5 ,6 และ 7 ตามลำดับค่าแรงดันที่ได้เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่

เป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง โดยที่ค่าแรงดันคงที่ ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแต่ละโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวมลดลง

ตารางที่ 5 ผลการอนุกรมโมดูลที่1และ2(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	34.33	22.96	14.78	14.89	10.26	10.08	9.82
แรงดัน (V)	1.06	0.98	1.14	1.16	1.78	1.11	1.17
กำลังไฟฟ้า(mW)	36.39	22.50	16.85	17.27	18.26	11.19	11.49

ตารางที่ 6ผลการอนุกรมโมดูลที่1,2และ3
(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	33.68	24.35	23.42	21.02	20.81	18.12	17.61
แรงดัน (V)	1.14	1.56	1.38	1.27	1.21	1.10	0.90
กำลังไฟฟ้า(mW)	38.40	37.99	32.32	26.70	25.18	19.93	15.85

ตารางที่ 7 ผลการอนุกรมโมดูลที่1,2,3และ4
(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	54.4	46.7	44.0	37.2	18.86	17.84	14.46
แรงดัน (V)	2.21	2.71	2.85	3.05	2.67	1.82	1.64
กำลังไฟฟ้า (mW)	120.22	126.56	125.40	113.46	50.36	32.47	23.71

5.3 การขนานของของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล มาต่อร่วมกันแบบขนานโดยเพิ่มจำนวนโมดูลเชื่อมต่อทีละโมดูล จากการทดลองตามตารางที่ 8 ,9 และ 10 ตามลำดับค่าแรงดันที่ได้คงที่ กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ โดยที่ค่าแรงดันลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแต่ละโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวมลดลงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 8 ผลการขนานโมดูลที่ 1 และ 2
(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	40.43	35.68	35.02	34.22	30.15	29.74	27.36
แรงดัน (V)	1.06	1.08	1.02	1.09	1.04	0.98	1.07
กำลังไฟฟ้า(mW)	42.86	38.53	35.72	37.30	31.36	29.15	29.28

ตารางที่ 9 ผลการขนานโมดูลที่1,2 และ3
(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	67.69	65.34	65.01	62.32	60.19	58.76	56.65
แรงดัน (V)	1.14	1.12	1.08	1.05	0.98	1.12	1.09
กำลังไฟฟ้า(mW)	77.17	73.18	70.21	65.44	58.99	65.81	61.75

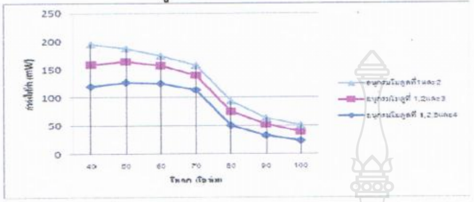
ตารางที่ 10 ผลการขนานโมดูลที่ 1, 2, 3 และ 4(T_h=190 °C, T_c = 10 °C)

โหลด (Ω)	40	50	60	70	80	90	100
กระแส (mA)	88.59	87.59	84.23	82.79	81.05	79.84	76.54
แรงดัน (V)	1.49	1.62	1.45	1.50	1.32	1.56	1.42
กำลังไฟฟ้า(mW)	132.00	141.90	122.13	124.19	106.99	124.55	108.69

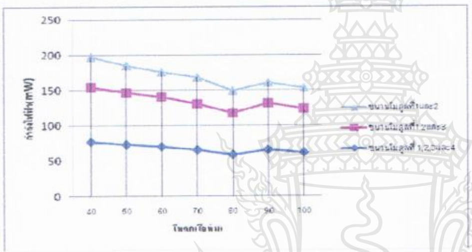
6. สรุป

จากผลการทดสอบวัดค่ากำลังไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคทั้งการเชื่อมต่ออนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคและการเชื่อมต่อขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค นำมาพล็อตกราฟได้ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเปลี่ยนสำหรับการต่อแบบอนุกรมนั้นมีค่าต่ำกว่าการต่อแบบขนาน ถ้าพิจารณาในสภาพเลวร้ายที่เป็นไปได้ เช่นมีปัจจัยทำให้คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแตกต่างกัน การต่อแบบขนานจะให้ค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดีกว่าแบบอนุกรม ความจริงข้อนี้สามารถนำไปใช้พิจารณาการใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคได้ โดยยึดหลักว่าหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยปราศจากวงจรแปลงผันไฟฟ้า การต่อแบบอนุกรมจะใช้งานกับโหลดได้ย่านกว้างกว่าการต่อแบบขนาน ในทางตรงข้ามหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคร่วมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่สามารถ

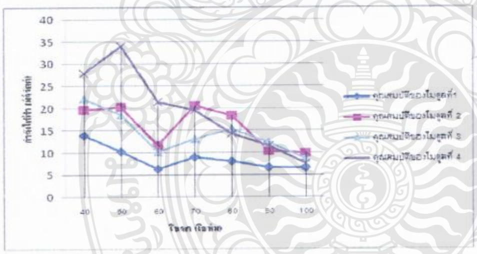
โปรแกรมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ [4] การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในรูปแบบขนานจะให้ประสิทธิภาพกำลังสูงกว่า



รูปที่ 6 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบขนาน



รูปที่ 7 กราฟของค่ากำลังไฟฟ้าเทียบกับโหลดในการเชื่อมต่อโมดูลแบบขนาน



รูปที่ 8 กราฟคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

จากรูปที่ 8 ผลที่ได้นี้เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

7.เอกสารอ้างอิง

[1] Anders Killander, John C. Bass, 1996, "A Stove-Top Generator For Cold Areas", *IEEE 15th International Conference on Thermoelectric*, pp.390-393

[2] Yuri Gurevich, Georgiy Logvinov and Igor Volovichev, " Nonequilibrium Carriers of Charge in Thery of Thermoelectric Phenomena", *Proceedings of the 22nd International Conference on Thermoelectrics*, pp.464-467.

[3] Eakburanawat, J. and Boonyaroonate, I., 2005, "Development of a thermoelectric battery charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique", *Applied Energy*, Vol. 83, issue. 7, pp. 687-704.

[4] ณัฐ จันท์ครบ ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน อมร สมเจตน์ เลิศเจริญ และเจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, "การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของเตาหุงต้มในครัวเรือนด้วยเทอร์โมอิเล็กตริก", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 9-10 พฤศจิกายน 2549. หน้า 1194-1196.

[5] Lertsatthanakorn, C., K. Wongsim, N. Jariyanoravisse and N. Suwannata, 2003, "Experinental Study of a Lamp Thermoelectric Generator",The 2nd Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment,Phuket,Thailand,pp.544 – 547.

[6] นพพร พัชรประกิติ*, ยุทธสิทธิ์ แสนเรือน และ พันธ์ชัย กาวิชัย, "ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานเทอร์โมอิเล็คทริค", การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1,คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ 31 สิงหาคม 2550

[7] ณัฐ จันท์ครบ,เสรี ชื่นอารมณ์,เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, "การวิเคราะห์รูปแบบการต่อเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด",การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5,10-11 พฤษภาคม 2550

MAHASARAKHAM UNIVERSITY
TREC-6
กระทรวงพลังงาน
MINISTRY OF ENERGY
ptt
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6
The 6th Thailand Renewable Energy for Community Conference
TREC-6
13-15 พฤศจิกายน 2556
ณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
CP ไฟฟ้าชุมชน
CF เชื้อเพลิงชุมชน
CT ความร้อนชุมชน
EC การประหยัดพลังงาน
CE สิ่งแวดล้อมชุมชน

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ธีรพจน์	พุทธิกีฏกวีวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ศักดิ์เดช	สังคพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ	ทัศนภักดิ์	มหาวิทยาลัยศรีประทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักกรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ	ประทุมนพรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวย	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิธาร์	ธนรักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรนุช	แจ้งสว่าง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวงศ์	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤษตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	มุฑุกันณ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระวุฒิ	อรุณวรรธนะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ	วรศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ดร.บวรกิตติ์	เนคมานุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ศุภชัย	ฤทธิ์เจริญวัฒฤ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ปรเมษฐ์	จันทร์เพ็ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุชาติ	โอษคลัง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อภิพงษ์	พุฒคำ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์หิรัญนุสรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.นิชุดา	สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุภกร	หาญสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุรชัย	จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.เพชรรัตน์	ใจบุญ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
อาจารย์ ดร.พิมลวพรรณ	กำพลานนท์วัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.วรจิต	เศรษฐพรรค	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์หิรัญนุสรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สถาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วิรชัย	โรยนรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ นุอร	ชูทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ปรีชา	ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ วุฒิศาสตร์	โชคเกื้อ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ธีรภัทร์	อนุชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
อาจารย์ ยุทธนา	อุไรชื่น	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อาทิตย์	ฉิ่งสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ประธาน	ศรีวิไล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ดาริน	อ่อนขาว	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. อำพล	อาภาชนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทความวิจัย: ไฟฟ้าชุมชน (CP)		หน้า
CP001	การวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MatLab Simulik นายคณิต พิมพ์คำไหล	233
CP002	การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบใช้กังหันสองชุดติดตั้งบนแกนเดียวกัน นายวินัย บุญน้อย	242
CP003	การประเมินศักยภาพพลังงานลมจากข้อมูลสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา นายวรสิทธิ์ ศรีบุญ	251
CP004	เครื่องวัดพลังงานและคำนวณค่าไฟฟ้าของหลอดแอลอีดีฟลูออเรสเซนต์กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเวลาจริง นายผดุง กิจแสวง	259
CP005	การควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำของระบบเชื่อมโยงพลังงานทดแทนในชนบท นายอมร อันกรอง	267
CP006	การผลิตไฟฟ้าจากคลื่นทะเลสำหรับชุมชนห่างไกล นางสาวณัฐวรรณ หรั่งแก้ว	276
CP007	การควบคุมกำลังแอ็กทิฟโรงต้นกำลังเซลล์เชื้อเพลิงในระบบจำหน่าย โดยใช้ตัวแปลงผันพีดับเบิลยูเอ็ม นายบรรณฎัติ บริบูรณ์	280
CP008	การศึกษาและออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับระบบพลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ นางสาวเสาวนีย์ กันติะ	290
CP009	ศึกษาการออกแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฉนวนเรซิ่น นายวิทยา โสสีทา	297
CP010	การจำลองเส้นโค้งสมรรณะของกังหันลมแบบแกนนอน นายอภิชาติ ไชยขันธุ์	305
CP011	การศึกษาชุดควบคุมประจุไฟฟ้าแบบสมาร์ทสำหรับแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ นายยุทธพงษ์ ทองช่วง	314
CP012	การออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบครอสโฟล์วด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล นายบัณฑิต เสรีจกิจ	322
CP013	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพใบกังหันลมด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล นายชาคริต จีนลอย	332
CP014	การออกแบบระบบโฟโตโวลตาอิกสำหรับชุมชนในชนบทไทย นายมนตรี สุขเศรษฐ์	337
CP015	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเทสล่า ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์คแกป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นายสุพจน์ วรธิพรหมมา	346

CP001

การวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab Simulik

The Analysis of module power, joining Thermo Electric TEG12750D compared with experimental simulation using Matlab Simulik

คณิต พิมพ์คำไหล และ บุญยัง ปลั่งกลาง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์: 02-549-3571, 081- 492- 9562 โทรสาร: 02-549-3422
E-mail: kanit2547@thaimail.com, pboonyang@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายโมดูลให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล โดยการติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริคด้านร้อนเข้ากับแผ่นลวดความร้อนขนาด 1000 วัตต์และด้านทำความเย็นติดตั้งกับกล่องรับน้ำเย็น นำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันในลักษณะขนานและอนุกรมและจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik เพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบ จากผลการทดลองพบว่าการต่อโมดูลแบบอนุกรมจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อโหลดที่ต่ำกว่าการเชื่อมต่อแบบขนาน ขณะที่การเชื่อมต่อแบบขนานจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม เมื่อทำการเพิ่มโมดูลมากขึ้นผลการทดลองกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการเชื่อมต่อแบบขนานจะมีค่าแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมปรากฏว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน

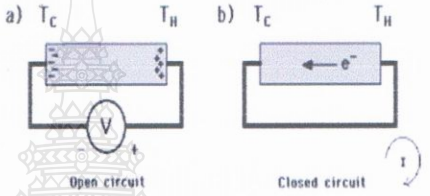
คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริค, อนุกรม, ขนาน

1. บทนำ

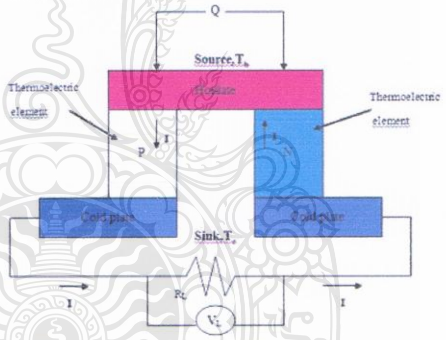
เทอร์โมอิเล็กทริคเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริคในเชิงควอนตัมฟิสิกส์เรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริคได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงก็จะถ่ายเทไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั้นคือมีอิเล็กตรอน (Electron) และ โฮล (Hole) เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้ไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างเครื่องทำความเย็นได้ การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริคได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้งานประจำวัน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเตาหุงต้ม[1] แต่เนื่องจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ชนิด N และ P หลายตัว การนำไปใช้โมดูลเดียวจึงไม่เป็นปัญหา แต่เมื่อต้องการสร้างระบบให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นจำเป็นต้องใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลาย ๆโมดูลมาต่อร่วมกัน ความไม่เท่ากันในคุณสมบัติต่าง ๆของแต่ละโมดูล และอุณหภูมิที่แต่ละโมดูลได้รับจะมีผลทำให้ขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมไม่เป็นไปอย่างที่คาดหวัง ในทางปฏิบัติสามารถแก้ไข

ได้ด้วยการเลือกเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคที่คุณสมบัติเหมือนกันหมดหรือใกล้เคียงกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วผู้ใช้ไม่มีสิทธิ์ที่จะเลือกโมดูลมาทำการเชื่อมต่อได้ ซึ่งการได้มาของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค รุ่นเดียวกันแต่ต่างกันที่ช่วงเวลาการผลิต รวมถึงความไม่สม่ำเสมอและคงที่ในกระบวนการผลิต ทำให้คุณสมบัติในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลแตกต่างกันออกไป เมื่อนำมาต่อร่วมกันย่อมทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมเปลี่ยนแปลงไป ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์วิธีการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในลักษณะที่แตกต่างกันที่ทำให้ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ ภายใต้สมมุติฐานความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติทางไฟฟ้าในแต่ละโมดูล

2.โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริค



รูปที่ 1 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริค

เทอร์โมอิเล็กทริคสร้างพลังงานไฟฟ้าจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังรอยต่อ P-N กับผนังอีกด้านของสาร P,N ดังรูปที่ 1 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่วนรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริค ค่าความต่างศักดิ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างผนังทั้งสองด้านนี้กระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck) เป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันควาวมร้อนเป็นไฟฟ้าความสำคัญทางกายภาพของมันสามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัดผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของพาหะไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ P และ N ก่อตัวเป็นอำนาจสนามไฟฟ้าภายในที่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิ สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$\Delta v = \alpha(\nabla T) \quad (1)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารกึ่งตัวนำ T คือฟังก์ชันอุณหภูมิระว่างผนังของเทอร์โมอิเล็กทริค และเมื่อพิจารณาถึงรายละเอียดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำทั้งสองขณะใช้งาน[2] พบว่า

$$v = -\left(\frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\alpha_n + \alpha_p}\right)\Delta T \quad (2)$$

และค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นตามสมการ

$$r_i = \frac{2a}{(\sigma_n + \sigma_p)}\left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_n}\frac{1}{\xi acth\xi a + 2\tau Sa\xi^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ $\xi^{-1} = \sqrt{\frac{2\tau T_0}{e^2 n_0}\frac{\sigma_n \sigma_p}{(\sigma_n + \sigma_p)}}$ เป็น Diffusion ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ และ $\tau = \frac{1}{2\gamma_i n_0}$, โดยที่ γ_i คือ capture coefficient ในสารกึ่งตัวนำ n_0, p_0 คือ ปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารชนิด N,P α_n, α_p คือค่าสัมประสิทธิซีเบคในสารN,P $\sigma_n = \rho_n \mu_n, \sigma_p = \rho_p \mu_p$ คือสภาพความนำไฟฟ้าของสาร N,P ρ_n, ρ_p คือความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P μ_n, μ_p คือสภาพความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสาร N,P และ S คือพื้นผิวที่เกิด Recombination ซึ่งในกรณีที่มีกระแสไหลมากๆแล้ว $(S \to \infty), (\tau \to 0)$ ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดรูปเป็นดังสมการ

$$r_i = \frac{2a}{\sigma_n + \sigma_p} \quad (4)$$

ความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตจะส่งผลให้เกิดปริมาณพาหะการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ซึ่งผลดังกล่าวนี้ทำให้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆโมดูลมาเชื่อมต่อกันความแตกต่างเหล่านี้จะส่งผลถึงการด้อยประสิทธิภาพลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริคโดยรวม

3.การทดลองต่อร่วมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

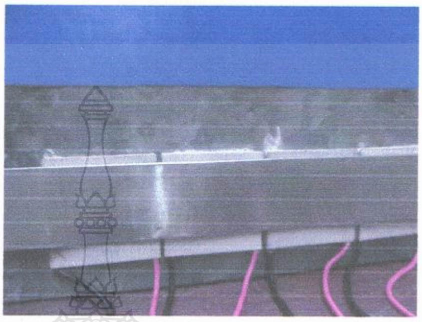
การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคหลายๆโมดูลให้ทำงานร่วมกันสามารถทำได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบอนุกรม การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบขนาน และการเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแบบผสม จากความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูล ทำให้การเชื่อมต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในแต่ละแบบให้ประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างในคุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแต่ละโมดูลที่นำมาเชื่อมต่อกัน

4.การทดลอง

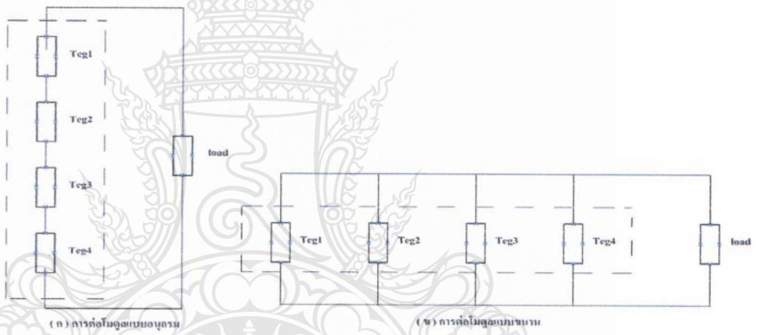
4.1 การทดลองวัดค่าจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อน จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริคจำนวน 4 โมดูล ประกอบอยู่บนโครงสร้างระบบเดียวกัน โดยยึดติดผนังด้านร้อนของระบบด้วย ฮีทเตอร์ ขนาด 1000 วัตต์ และผนังด้านเย็นของระบบระบายความร้อนออกด้วยน้ำเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยในการทดลองจะทำการทดสอบคุณสมบัติ

ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล และทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ทั้งในลักษณะการขนานและการอนุกรม โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

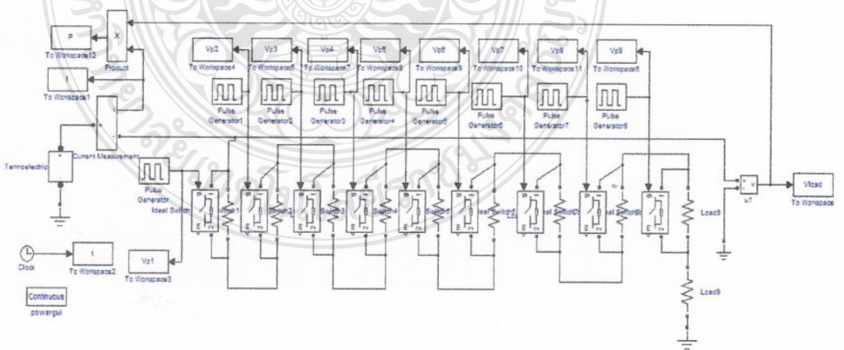


รูปที่ 3 ชุดทดสอบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริคโมดูลร่วมกัน

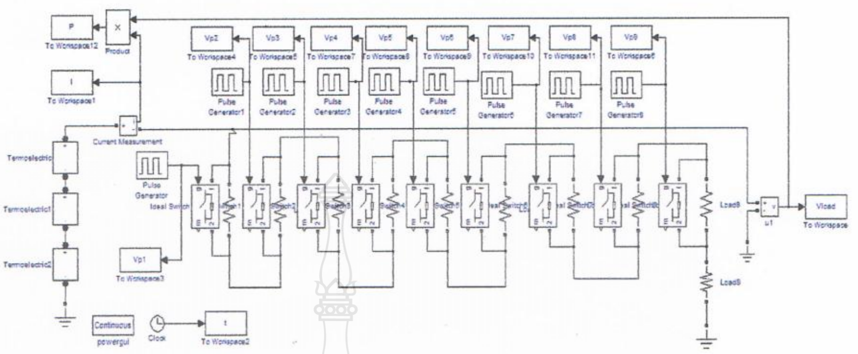


รูปที่ 4 วงจรการต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

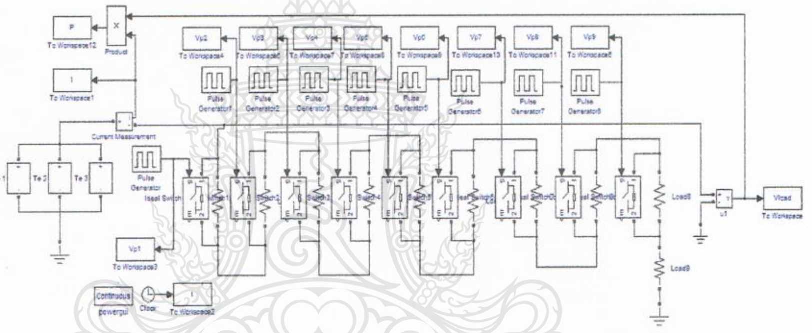
4.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



รูปที่ 5 จำลองการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik



รูปที่ 6 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik



รูปที่ 7 จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulik

5. ผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

จากข้อสมมุติฐานดังที่กล่าวข้างต้น จำเป็นต้องเก็บข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของแต่ละโมดูลไว้เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์ ได้ผลการทดสอบในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	2.97	2.78	2.54	2.16	1.87	1.54	1.42	1.22	1.05	0.94	0.67
แรงดัน (V)	2.78	2.97	3.01	3.12	3.17	3.20	3.57	3.81	4.07	4.24	4.78
กำลังไฟฟ้า(W)	8.26	8.26	7.65	6.74	5.93	4.93	5.07	4.65	4.27	3.99	3.20

5.2 การอนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันแบบอนุกรม ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการอนุกรมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	8.91	8.04	7.29	6.72	6.36	5.31	4.77	4.32	3.63	3.33	2.76
แรงดัน (V)	8.34	8.91	9.03	9.36	9.51	9.6	10.71	11.43	12.21	12.72	14.34
กำลังไฟฟ้า(W)	74.31	71.64	65.83	62.90	60.48	50.98	51.09	49.38	44.32	42.36	39.58

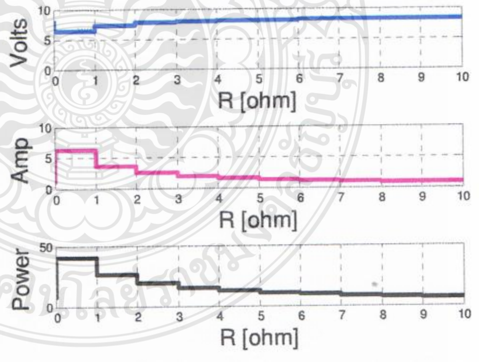
5.3 การขนานของของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค

เมื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคมาต่อร่วมกันแบบขนาน ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ผลดังตารางที่ 3

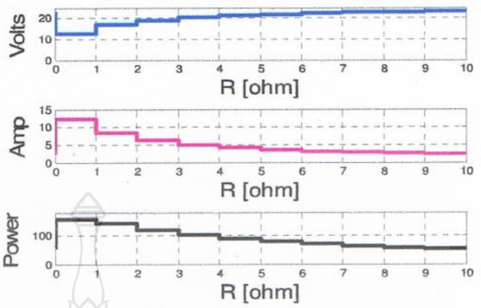
ตารางที่ 3 ผลการขนานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค ขณะที่ Voc = 15.2 V,Isc = 30 A,ri = 0.35 Ω,T_h=190 °C

โหลด (w)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแส (A)	5.94	4.88	4.26	3.78	3.84	3.08	2.44	1.88	1.74	1.88	1.22
แรงดัน (V)	5.56	5.94	6.02	6.24	6.34	6.4	7.14	7.62	8.14	8.48	9.56
กำลังไฟฟ้า(W)	33.03	28.99	25.65	23.59	24.35	19.71	17.42	14.33	14.16	15.94	11.66

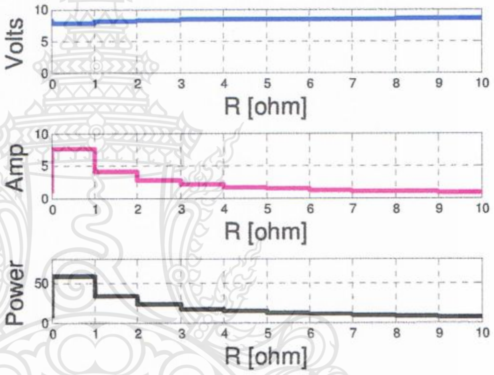
5.4 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



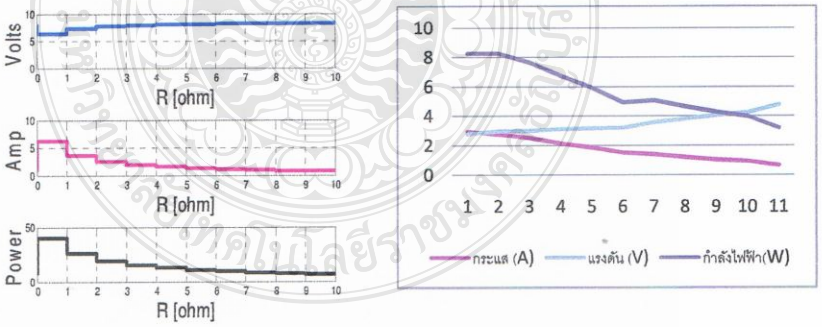
รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้วยโปรแกรม Matlab simulik

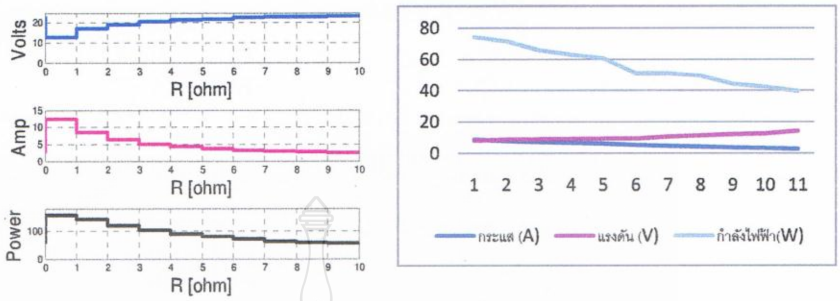


รูปที่ 10 กราฟแสดงผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้วยโปรแกรม Matlab simulik



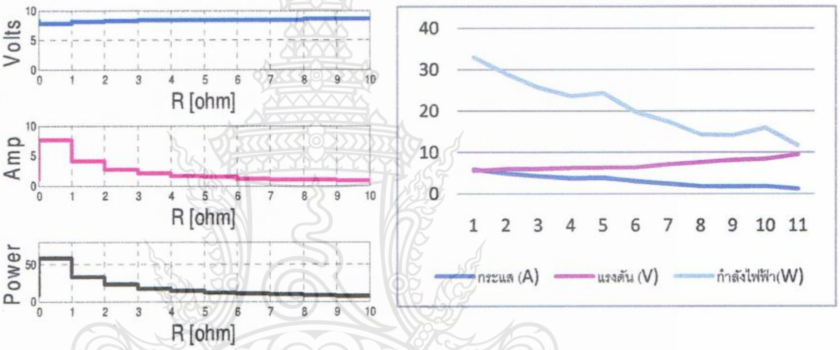
(ก)ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 11 กราฟแสดงคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริคเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)



(ก)ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่ออนุกรมกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)



(ก) ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ข)ผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่จำลองการทำงานการต่อขนานกันของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ด้วยโปรแกรม Matlab simulik (ก)และผลที่ได้จากการทดลอง(ข)

6. สรุป

จากการทดลองโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจะเห็นว่าเมื่อเราทำการเพิ่มโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย สามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 8และเมื่อทำการทดสอบวัดค่ากำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคจากการเชื่อมต่อกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคทั้งการเชื่อมต่ออนุกรมกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคและการเชื่อมต่อขนานกันของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริค นำมาพล็อตกราฟได้ในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10ตามลำดับ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเปลี่ยนสำหรับการต่อแบบอนุกรมนั้นมีค่าต่ำกว่าการต่อแบบขนาน ถ้าพิจารณาในสภาพเลวร้ายที่เป็นไปได้ เช่นมีปัจจัยทำให้คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคแตกต่างกัน การต่อแบบขนานจะให้ค่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบอนุกรม ความจริงข้อนี้สามารถนำไปใช้พิจารณาการใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคได้ โดยยึดหลักว่าหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคโดยปราศจากวงจรแปลงผันไฟฟ้า การต่อแบบอนุกรมจะใช้งานกับโหลดได้ย่านกว้างกว่าการต่อแบบขนาน ในทางตรงข้ามหากใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคร่วมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่สามารถ

โปรแกรมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ [4] การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคในรูปแบบขนานจะให้ประสิทธิภาพกำลังสูงกว่า ผลที่ได้นี้เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริคค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มโมดูลมากขึ้นผลการทดลองกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการเชื่อมต่อแบบขนานจะมีค่าแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมปรากฏว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน

7.เอกสารอ้างอิง

[1] Anders Killander, John C. Bass, 1996, "A Stove-Top Generator For Cold Areas", IEEE 15th International Conference on Thermoelectric, pp.390-393

[2] Yuri Gurevich, Georgiy Logvinov and Igor Volovichev, " Nonequilibrium Carriers of Charge in Thery of Thermoelectric Phenomena", Proceedings of the 22nd International Conference on Thermoelectrics, pp.464-467.

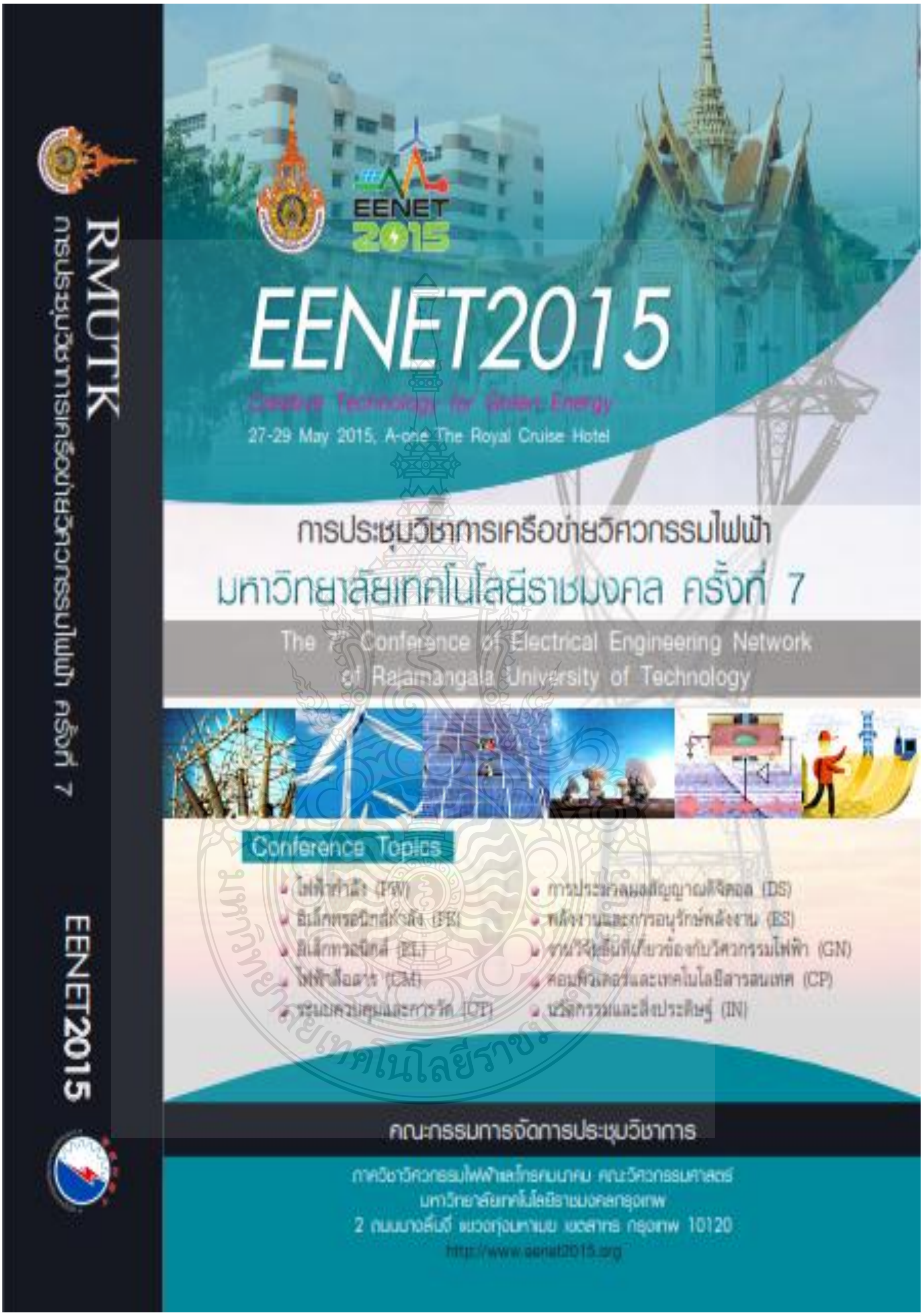
[3] Eakburanawat, J. and Boonyaroonate, I., 2005, "Development of a thermoelectric battery charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique", Applied Energy, Vol. 83, issue. 7, pp. 687-704.

[4] ณัฐ จันท์ครบ ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน อมร สมเจตน์เลิศเจริญ และเจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, "การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของเตาหุงต้มในครัวเรือนด้วยเทอร์โมอิเล็กตริก", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 9-10 พฤศจิกายน 2549. หน้า 1194-1196.

[5] Lertsatthanakorn, C., K. Wongsim, N. Jariyanoravisse and N. Suwannata, 2003, "Experinental Study of a Lamp Thermoelectric Generator",The 2nd Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment,Phuket,Thailand,pp.544 – 547.

[6] นพพร พัชรประกิติ*, ยุทธสิทธิ์ แสนเรือน และพันธ์ชัย กาวิชัย, "ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานเทอร์โมอิเล็คทริค", การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1,คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ 31 สิงหาคม 2550

[7] ณัฐ จันท์ครบ,เสรี ชื่นอารมณ์,เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, "การวิเคราะห์รูปแบบการต่อเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด",การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5,10-11 พฤษภาคม 2550


RMUTK
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 7
EENET2015
EENET 2015
EENET2015
27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
The 7th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology
Conference Topics
คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET)

นับว่าเป็น เกียรติอย่างยิ่งที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ได้เป็นเจ้าภาพในการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET) ซึ่งการจัดประชุมในครั้งนี้นับเป็นครั้งที่ 7 โดยเครือข่ายได้มีการขยายวงกว้างออกไปสู่สาขาที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น อิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม คอมพิวเตอร์ และสาขาที่ใกล้เคียง นอกจากนั้นยังเปิดรับการแลกเปลี่ยนด้านนวัตกรรมทั้งด้านสิ่งประดิษฐ์ และด้านการจัดการศึกษา ทางคณะกรรมการดำเนินงานได้กำหนดจัดการประชุมวิชาการในครั้งนี้ระหว่างวันที่ 27-29 พฤษภาคม 2558 ณ โรงแรม A-ONE The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ภายใต้หัวข้อ "Creative Technology for Green Energy" เพื่อเป็นการตอกย้ำถึงการมีส่วนร่วมของเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าในการพัฒนา เทคโนโลยีที่สอดรับกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติ ฉบับปัจจุบัน ตลอดจนการปลูกฝังการร่วมกันให้ความสำคัญเทคโนโลยีเพื่อโลกอนาคตร่วมกัน

ใน นามของคณะกรรมการดำเนินงานในครั้งนี้ ขอเชิญชวนนักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษาทั้งที่สังกัดมหาวิทยาลัย/สถาบันในเครือข่าย รวมถึงมหาวิทยาลัย/สถาบัน/องค์กร หน่วยงานภาคเอกชน ทุกแห่ง ที่มีผลงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการประชุมในครั้งนี้ส่งร่วมแลกเปลี่ยน ความรู้สู่โลกอนาคตร่วมกัน

ครั้งที่	[illegible]	ปี พ.ศ.
1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2551
2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	2553
3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2554
4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	2555
5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2556
6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2557
7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	2558
8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	2559
9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2560
10	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2561

มทร.ธัญบุรี มทร.ล้านนา มทร.สุวรรณภูมิ มทร.อีสาน มทร.พระนคร

มทร.ศรีวิชัย มทร.กรุงเทพ มทร.รัตนโกสินทร์ มทร.ตะวันออก ส.ปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร. ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร. โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พฤกษ์ภัทรานนต์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี กาญจนะเดชะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. เวคิน ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. กีรติ ชยะกุลคีรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิพัทธ์ หงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ หวังนิพพานโต	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร. เสถียร ธัญญศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร ศิริสำราญนุกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร. ไกศล โอพาราไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร. [illegible]	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร. พิสิฐ บุญศรีเมือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฏฐา จินดาเพ็ชร์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ [illegible]	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ สมชิน วาสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมารถ ขำเกลี้ยง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสิฐ ม่วงนวล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยวัฒน์ สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อำนวย เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา ขำสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทัศน์ สุวรรณศรีวัน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำเริง ฮินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศักรพงษ์ จารุมิตร	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย คามเกิดศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินวล พฤกษาบุบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประยุทธ คุณพลงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา สาคะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัควัฒน์ จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤตเมธ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนศักดิ์ เอกบูรณวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล ป้อมสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันไชย คำเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พานิช อินต๊ะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีรจน์ พิราจแบนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาวิตต์ ตัณฑนุช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธวัชชัย ทางวัฒนสุวรรณ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย แดงเอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทน สานอารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชญ ดาวายนต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โกศล บีริเดดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กมลทิพย์ วัฒกีม้วรา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สราวุฒ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาฤณี กุลพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดนุพล คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีรจน์ เตชรทัพส์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันธ์พงศ์ ดลิษากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธินันท์ ต้นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ เพียงหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิษณุ ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิพนธ์ เลิศมโนกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติกร ขันแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร. กีรติ อินทวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร. วฤทธิ์ วิชกูล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อาจารย์ ดร. สันติ บุราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อาจารย์ ดร. ณฐภัทร พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. พฤศยน นินทนาวงศา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ศิริชัย เตรียมล้ำเลิศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. วิเชียร ธูปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. แสนศักดิ์ ดีอ่อน	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
อาจารย์ ดร. สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. กฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.พรเทพ ปัญญาแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. พิชัย อยู่เปล่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เมธา ทัศคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. บำพน พิพัฒน์วิทยุทธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. สัณหวัจน์ ทองแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เสกสรร พลสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ พันธุนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พนา ดุสิตากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ เดชฟุ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พสิษฐ์ สุวรรณกิจการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. อุมารินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. นาตยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร. ศรีสุดา ไชยทองสุก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. สมพร ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. วรรณวีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. มงคล ดุพิมาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. ประสพโชค โห้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. มนตรี สมดุลยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. ไกรฤกษ์ เชยชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. วิฑูรย์ พรมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นพพร พัชรประกิติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ชาญฤทธิ์ กาญจนพิบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ เคลือบวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ทศกฤษณ์ บุญคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นภดล มณีเทียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. บุศรี จิตกสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นิวัติ บุญเป็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ประชา ยืนยงพุฒ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. สุบงกช โตไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. อนันท์ น้ำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ รัก สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ อาภาพล มหาวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ จีระพงศ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ภานุมาศ แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ เขษฎา พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ นครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สยาม ประจุศทยศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ มีชัย แผ่นใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สุขุม จุฬาจตุรศิระรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ยุรา คล่องแคล่ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ขอบคุณ ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สุวัฒยา ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ว่าที่ รต. กฤษฎา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ นราวิทย์ กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ปริญญา กิตติสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ สมหาย เนียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ นิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ภัทรพงศ์ อัญชันมาลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ สมยศ สันติมาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ วุฒิไกร จันทร์ชาวเลียบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ตะวัน ขุนสาคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ มนัส บุญเพียรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สาคร วุฒิพัฒนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ เวหรินทร์ ธัญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สุวสิทธิ์ ประกอบกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ อดิศักดิ์ วีริยกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ อานนท์ สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ณภัชญา ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ธนะกิจ วัฒกีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ นิยมิต นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ พัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ นาตียา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ อานนท์ พ่วงพิงงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ สุวุฒิ คุ้มทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ เอกชัย เนาวนิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ชูศักยฐ์ กมลชันติระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ เอกพล หนูสุเนนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ วินัย ณหาวิทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สายชล ชุดเจือจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ สุภณ พลสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ กิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ รุ่งเพชร ก้องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ มงคล ด่านบำรุงตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สิทธิชัย บุญปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ อดิศักดิ์ แซ่งสาริกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ โสภา แซ่เล้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ เจษฎาพร สถานทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ศิลพล นำเมียวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ กาญบัญชา พานิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ปกรณ์ ชูโพนาระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ชาญยุทธ อุปายโกศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ พีรวัฒน์ มีสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ภูชิต ถึงสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ เมาฒิน หาญณรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ เรืองยศ นาครักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ โกวิท พิมภก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ พุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สามารถ ยะเรืองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ไชยยันต์ บุญมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร. สุวิทย์ อัจฉริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว)
ดร. อรรถ พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ดร. ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร. ชนัญฎา จันสุทธิ	มหาวิทยาลัยมหิดล
อาจารย์ มนัสศิริ จันสุทธิรา	มหาวิทยาลัยมหิดล
อาจารย์ ปรัชญ์ สล่างาน	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร. สุรนันท์ น้อยมณี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

EENET 2015

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology

[illegible]					
0800-0830 น.	[illegible]				
0830-0900 น.	[illegible] EENET 2015 [illegible]				
0900-1000 น.	Keynote Speaker 1 [illegible]				
1000-1015 น.	Coffee Break				
1015 – 1115 น.	Keynote Speaker 2 [illegible] Zero energy consumption EV				
11.15 – 12.15 น.	Keynote Speaker 3 [illegible] Smart Grid [illegible]				
1215-1300 น.	[illegible]				
ห้อง	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Session	PW-A	PE-A	CM-A	IN-A	Tutorial 1
1300-1445 น.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
1445-1500 น.	[illegible]				
Session	PW-B	PE-B	CM-B	IN-B	Tutorial 1
15.00-16.45 น.	PW12-PW17	PE09-PE15	CM10-CM18	IN06-IN10	[illegible]
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
17.00-18.00 น.	[illegible] EENET [illegible]				
18.30-22.00 น.	[illegible]				

![EENET 2015]

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology

[illegible]					
ห้อง	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Session	PW-C	PE-C	CMC	IN-C	CP-A
0840-1020 น.	[illegible]	PE13-PE19	[illegible]	IN11-IN17	CP01-CP06
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1020-1035 น.	[illegible]				
Session	PW-D	PE-D	CT-A	IN-D	CP-B
1035-1215 น.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	IN18-IN22, IN24, IN25	CP08-CP14
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1215-1300 น.	[illegible]				
Session	PW-E	PE-E, GN-A	CT-B	IN-E, ES-A	CP-C
1300-1445 น.	PW33-PW44	[illegible]	CT09-CT13	IN25-IN28, ES02-ES03	CP15-CP22
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1445-1500 น.	[illegible]				
Session	PW-F	GN-B	CT-C	ES-B	CP-D
1500-1645 น.	PW45-PW50	GN02-GN08	CT14-CT18	ES05-ES08, ES10-ES11	CP24-CP29
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

EENET 2015

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology

[illegible]					
ห้อง	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Session	EL-A	GN-C	CM-E	ES-C	Tutorial 2
0840-1020 น.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	STM32 Discovery
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	และ Waijung Blockset
1020-1035 น.	พักรับประทานอาหารว่าง				
Session	EL-B	GN-D	DS-A	ES-D	Tutorial 2
1035-1215 น.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ES20-ES24	[illegible]
ประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	STM32 Discovery
รองประธาน	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	และ Waijung Blockset
1215-1300 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน				
Session	EL-C	GN-E	-	ES-E	Tutorial 2
1300-1445 น.	EL14-EL22	[illegible]	-	ES25-ES31	[illegible]
ประธาน	[illegible]	[illegible]	-	[illegible]	STM32 Discovery
รองประธาน	[illegible]	[illegible]		[illegible]	และ Waijung Blockset
1445-1500 น.	[illegible]				
1500-1600 น.	พิธีปิดการประชุม				

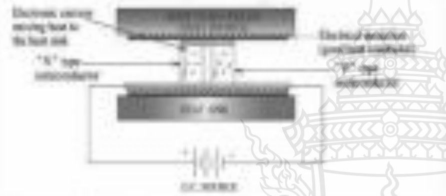
บทความสาขาพลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)

	บทความสาขาพลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)	หน้า
ES08	ชุดจำลองกังหันลม // Wind Turbine Simulator [illegible] [illegible]	353
ES09	[illegible] ด้วยโปรแกรม Building Energy Code (กรณีศึกษา : อาคารสำนักงานเก่า) // A building envelope improvement for increasing energy efficiency in building by Building Energy Code program (Case study : Existing office building) [illegible] [illegible]	356
ES10	[illegible] // Voltage Analyzed for Influencing the Load [illegible] [illegible]	360
ES11	[illegible] // Variable Speed Drive for energy saving in oil pump [illegible] [illegible]	364
ES12	[illegible] // Battery Charger Unit from waste heat of Split Type Air Conditioning System by Thermoelectric [illegible] [illegible]	368
ES13	[illegible] // Analysis and Implementation of Electricity generation by Thermoelectric Module [illegible] [illegible]	372
ES18	[illegible] ด้วย Levenberg-Marquardt Algorithm // Forecasting of Solar Radiation Using Application of ANN by Levenberg-Marquardt Algorithm [illegible] [illegible]	376
ES19	[illegible] // Analysis and Design of Smart Charger Unit for PV Battery [illegible] [illegible]	380
ES20	Performanee Study of a Novel Liquid Metal Anode Solid Oxide Fuel Cell [illegible] King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	384

[illegible]

2. [illegible]

2.1 [illegible]



[illegible]

[illegible]

$$v = \alpha(\nabla T) \quad (1)$$

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R + R_L} \quad (2)$$

$$Q_h = \alpha I T_h + K\Delta T - 0.5 I^2 R \quad (3)$$

$$Q_c = \alpha I T_c + K\Delta T - 0.5 I^2 R \quad (4)$$

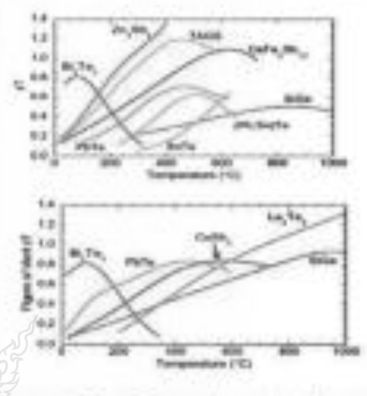
$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = \frac{I^2 R}{\alpha I T_h + K\Delta T - 0.5 I^2 R} \quad (5)$$

[illegible] TEG Module [illegible]

$$\eta_{max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{M - 1}{M + T_c/T_h} \quad (6)$$

$$M = \sqrt{1 + ZT_{avr}} \quad (7)$$

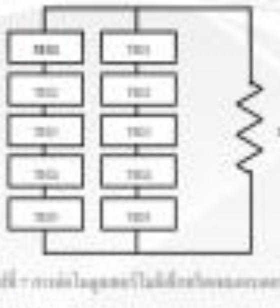
[illegible]



[illegible]

2.2 [illegible]

[illegible]


Load

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายคณิต พิมพ์คำไหล
วัน เดือน ปีเกิด	4 กุมภาพันธ์ 2520
ที่อยู่	185 หมู่ 1 บ้านแดง ต.บ้านแดง อ.พิบูลย์รักษ์ จ.อุดรธานี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม
	สำเร็จการศึกษาระดับครุศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2544 – 2546 บริษัท มาจินอลพร๊อพเพอร์ตี้ ตำแหน่ง หัวหน้าช่าง
	พ.ศ. 2546 – 2556 วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทฺโธ ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา ตำแหน่ง ครู ค.ศ.1 แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง
	พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทฺโธ ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา ตำแหน่ง ครู ค.ศ.2 แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี