

การพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสังกะสีออกไซด์ด้วยการเจืออลูมิเนียมสำหรับ
ประยุกต์เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

DEVELOPMENT OF Al - DOPED ZnO THERMOELECTRIC
MATERIALS FOR THERMOELECTRIC MODULE AND
THERMOELECTRIC GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-030-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF Al – DOPED ZnO THERMOELECTRIC
MATERIALS FOR THERMOELECTRIC MODULE AND
THERMOELECTRIC GENERATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2017-SC-M-030-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสังกะสีออกไซด์ด้วยการเจืออลูมิเนียมสำหรับประยุกต์เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
ชื่อนักศึกษา	นายศงคาร จันทรประทีป
รหัสประจำตัว	58605063
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรษฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือวัสดุที่มีความสามารถในการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและในทางกลับกันก็เป็นวัสดุที่สามารถผันพลังงานไฟฟ้าให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิขึ้นได้ ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถบอกได้ด้วยค่าไคแมนชั้นเลสฟิสิกเกอร์ออฟเมอริต(ZT) วัสดุสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในตระกูลของโลหะออกไซด์ที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูงเพราะมีจุลอมเหลวสูง เสถียรที่อุณหภูมิสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อเสียคือมีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในช่วงแรกของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเพื่อหาแนวทางและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ 1 – 5 เปอร์เซ็นต์ โดยวัสดุตั้งต้นจะถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้ง ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของสังกะสีออกไซด์ (PDF#890511) คุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของ $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ถูกตรวจสอบที่อุณหภูมิ 50 – 773 เคลวินด้วยเครื่อง LZT meter และได้ค่า ZT สูงสุดเท่ากับ 0.06 ที่ 773 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ได้มุ่งหมายไปที่การพัฒนาการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วโลหะเพื่อให้ได้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความสมบูรณ์ที่สุดโดยการพิจารณาเลือกวัสดุจากความต้านทานที่บริเวณรอยต่อพบว่าวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมและประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสคือโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมของเงิน 5% และจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลอื่น ๆ ที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ หากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง อาจก่อให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้

โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบจำนวน 16 ตัวพบว่าได้ค่ากำลังไฟฟ้าค่าออกสูงสุดเท่ากับ 1.6 มิลลิวัตต์ที่ $\Delta T = 500$ องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, เทอร์โมอิเล็กทริก, โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและ
สังกะสีออกซิเดียมอนอกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	DEVELOPMENT OF Al - DOPED ZnO THERMOELECTRIC MATERIALS FOR THERMOELECTRIC MODULE AND THERMOELECTRIC GENERATOR
Student Name	Singkarn Chanprateep
Student ID	58605063
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chesta Ruttanapun

Abstract

Thermoelectric (TE) materials have potentials to directly convert heat to electricity and vice versa. The efficiency of thermoelectric materials is governed by the dimensionless figure of merit, defined by ZT . Zinc oxide, ZnO , is the most interesting metal oxide thermoelectric materials working at high temperature because of its high melting point, stability at high temperature and environment-friendly. However, its ZT is relatively low. Here, we (i) improved ZT value of $Zn_{1-x}Al_xO$ compounds, and (ii) the best compound was used to develop the new junction between The TE cell and an electrodes. In the first part of this thesis, The $Zn_{1-x}Al_xO$ compounds were synthesized by classical solid state reaction method with Al_2O_3 doping contents of $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ and 0.05 . The samples' crystal structures were investigated by XRD, and the results were compared with the reference of ZnO (PDF#890511). The thermoelectric properties of $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ were measured from 50 to 773 K by LZT meter. The highest value of ZT was 0.06 at 773

K and it tended to increase with increasing temperature. In the second part, the new

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

junction between thermoelectric cells and electrode were developed by taking into account contact resistance for thermoelectric modules. The suitable welding materials for working at high temperature, 900°C , was copper 95% +silver 5%. The thermoelectric generator (TEG) which consist of 16 $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{O}$ thermoelectric modules can generated electrical power 1.6 mW $\Delta T = 500^{\circ}\text{C}$. Thus the $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{O}$ thermoelectric materials can be used for application of TEG at high temperature (900°C)

Keywords: *Al*-doped *ZnO*, Thermoelectric, Thermoelectric generator and Thermoelectric module



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากจัดจัดทำได้รับการสนับสนุนและการช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. เจริญธา รัตนพันธ์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้บทความทางวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก, ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและ ดร. อุดลย์ หาญวิงม่วง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สำหรับความกรุณาที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคำแนะนำสำหรับการปรับแก้วิทยานิพนธ์ให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. ศักดิ์วิบูลย์ จันทร์ราช และ ดร. ปิยวัฒน์ ทัพสนธิ นักวิจัยหลังปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับข้อคิดและคำแนะนำในการทำงานวิจัยอีกทั้งเป็นต้นแบบการทำวิจัยให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆน้องๆทุกคนภายในห้องปฏิบัติการเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุน คำปรึกษา การช่วยเหลือในทุกๆสิ่ง รวมถึงกำลังใจซึ่งขอบคุณจากใจจริง

ขอขอบคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินถึงแม้ว่าจะไม่เพียงพอก็ตาม

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการเป็นสถานที่การทำวิจัย

หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สร้างคุณประโยชน์ ข้าพเจ้าขอมอบความดีให้กับ บิดา มารดา ครอบครัวข้าพเจ้าและผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศฤงคาร จันทร์ประทีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปรัชญาการทอโมอิเล็กทรอนิกส์.....	5
2.1.1 ปรัชญาการทอซีเบค.....	5
2.1.2 ปรัชญาการทอเพลเทียร์.....	6
2.2 โมดูลทอโมอิเล็กทรอนิกส์.....	7
2.3 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทอโมอิเล็กทรอนิกส์.....	9
2.4 สมบัติทางทอโมอิเล็กทรอนิกส์.....	17
2.4.1 สภาพการนำไฟฟ้า.....	17
2.4.2 สัมประสิทธิ์ซีเบค.....	19
2.4.3 สภาพการนำความร้อน.....	19
2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทอโมอิเล็กทรอนิกส์.....	20
2.6 รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ.....	20
2.7 กฎของเคอร์ชอฟฟ์.....	22
2.8 สังกะสีออกไซด์.....	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 วิธีการสังเคราะห์ $Zn_{1-x}Al_xO$	27
3.2 การประกอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	30
3.3 กระบวนการวิเคราะห์.....	31
3.4 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า.....	35
3.4.1 ความต้านทานรอยต่อ.....	35
3.5 การทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	36
3.6 การทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	38
4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง.....	38
4.2 กำลังไฟฟ้าขาออกเบื้องต้น.....	40
4.3 ความหนาแน่นของพาหะ.....	41
4.4 คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก.....	41
4.4.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค.....	42
4.4.2 สภาพการนำไฟฟ้า.....	43
4.4.3 แผงเทอร์กำลังไฟฟ้า.....	43
4.4.4 สภาพการนำความร้อน.....	44
4.4.5 Dimensionless figure of merit.....	46
4.5 ผลของการพัฒนาการเชื่อมขั้ว.....	47
4.5.1 ผลการพิจารณาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ.....	48
4.6 การทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	50
4.6.1 การทดสอบเชิงไฟฟ้า.....	50
4.6.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของการเพิ่มจำนวนโมดูล เทอร์โมอิเล็กทริก.....	52
4.7 ผลการทดสอบความทนทานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	53
4.7.1 ผลการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้า.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.7.2 ผลการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพ โดยใช้รังสีเอ็กซ์.....	54
4.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและปริมาตรหน่วยเซลล์ของตัวอย่าง $Al - doped ZnO$	39
4.2 แสดงค่าความต้านทานรอยต่อของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่ 350 องศาเซลเซียส.....	48
4.3 แสดงค่าความต้านทานรอยต่อของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปราบกฎการณซ์ซีเบค.....	6
2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบค.....	6
2.3 ปราบกฎการณซ์เพลเทียร์.....	7
2.4 แสดงภาพแผ่นเพลเทียร์.....	7
2.5 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.6 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสองชนิด.....	8
2.7 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสารกึ่งตัวนำ n-type เพียงชนิดเดียว.....	8
2.8 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสารกึ่งตัวนำ p-type เพียงชนิดเดียว.....	9
2.9 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดอื่น.....	10
2.10 แสดงอัตราความร้อนไหลเข้า.....	13
2.11 แสดงอัตราความร้อนไหลออก.....	14
2.12 แสดงรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส.....	21
2.13 แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสตรง.....	23
2.14 แสดงการกำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า.....	23
2.15 โครงสร้างแบบ wurtzite (ซ้าย) โครงสร้าง zinc blende (ขวา).....	24
3.1 แสดงสารตั้งต้นสังกะสีออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์.....	28
3.2 แสดงสารตั้งต้นผสมรวมกันในครกอากาศ.....	28
3.3 แสดงถ้วยอลูมินาสำหรับใช้เผาสารที่อุณหภูมิสูง.....	28
3.4 แสดงบล็อกอัดสารและไฮดรอลิค.....	29
3.5 แสดงเตาที่ใช้ในการเผา.....	29
3.6 แสดงแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก Al-doped ZnO หลังการเผาแข็ง.....	29
3.7 แสดงแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกหลังอัดขึ้นรูป.....	30
3.8 แสดงขั้วอิเล็กโทรด stainless steel 310s.....	30
3.9 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	31
3.10 แสดงโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบผลึกตามกฎของแบรกก์.....	32
3.12 LZT meter.....	33
3.13 การจัดวางเครื่องมือสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพการนำไฟฟ้า, สภาพการนำความร้อน.....	34
3.14 การวัดค่า thermal diffusivity.....	34
3.15 แสดง (ก) แผนภาพและ (ข) วงจรการทดสอบเพื่อหาค่า ความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ.....	35
3.16 แสดงแผนภาพที่ทำการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	36
3.17 แสดงการต่ออนุกรมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเดียวกัน.....	37
3.18 แสดงการทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	37
4.1 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Al-doped ZnO.....	38
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของ ตัวอย่าง Al-doped ZnO.....	40
4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะ.....	41
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคและอุณหภูมิ.....	42
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	43
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	44
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนและอุณหภูมิ.....	45
4.8 แสดงค่าสภาพการนำความร้อน.....	46
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ZT และอุณหภูมิ.....	47
4.10 แสดงโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	50
4.11 แสดงการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	50
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ.....	51
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ.....	51
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและความแตกต่างของอุณหภูมิ.....	52
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของโมดูล เทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จำนวนหนึ่งและสองโมดูล.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออกของการทำงานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก จำนวน 1, 3 และ 10 ครั้ง.....	54
4.17 แสดงภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ก่อนการใช้งาน (ตัวที่ 1) โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์.....	54
4.18 แสดงภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ก่อนการใช้งาน (ตัวที่ 2) โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์.....	55
4.19 แสดงภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ หลังการใช้งาน 3 ครั้ง โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์.....	55
4.20 แสดงภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ หลังการใช้งาน 10 ครั้ง โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์.....	55
4.21 แสดงบล็อกโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทดสอบ.....	56
4.22 แสดงการทดสอบเบื้องต้นของบล็อกโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	57
4.23 แสดงการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก.....	57
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ขนาดเล็ก.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากของมนุษย์ในการดำเนินชีวิตประจำวัน เพื่ออำนวยความสะดวกในกิจกรรมต่างๆ เช่น กระบวนการการผลิตอาหาร การคมนาคม การดูแลสุขภาพความปลอดภัยและเทคโนโลยีสารสนเทศ ถึงแม้ว่าพลังงานจะมีมากมายหลายประเภท แต่พลังงานที่มนุษย์ใช้ในการดำเนินชีวิตประจำวันมากที่สุดคือพลังงานไฟฟ้าซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ว่านี้มักจะถูกเปลี่ยนรูปแบบมาจากพลังงานอื่น เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และอีกหลายพลังงานที่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านั้นมีปริมาณน้อยลงทุกวันและจะหมดไปอย่างแน่นอนในอนาคตข้างหน้าดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่น่าสนใจเป็นอย่างมากในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคต[1] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกคืออุปกรณ์ที่สามารถผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยอาศัยหนึ่งในปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่เรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค[2] ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนมากซึ่งทำมาจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกคือปัจจัยสำคัญในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยสองชนิดคือ n-type semiconductor ซึ่งเป็นชนิดที่มีพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนหรือประจุลบและอีกชนิดคือ p-type semiconductor ซึ่งเป็นชนิดที่มีพาหะส่วนมากคือโฮลหรือประจุบวก ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยค่าประสิทธิภาพการผันพลังงานจากความร้อนเป็นไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งค่าชี้บ่งความเป็นสมบัติวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือค่า Dimensionless Figure of Merit แทนด้วยสัญลักษณ์ ZT เป็นค่าที่คำนวณได้ตามสมการ $ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$ โดยที่ S , σ , κ และ T คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพนำไฟฟ้า, สภาพนำความร้อนและอุณหภูมิสัมบูรณ์ตามลำดับ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจำเป็นที่จะต้องที่มีค่า dimensionless figure of merit ที่สูงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีจำเป็นที่จะต้องมีความสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง สภาพนำไฟฟ้าสูง และสภาพนำความร้อนต่ำ ปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนมากคือบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) [3] และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) โดยที่บิสมัทเทลลูไรด์ จะถูกนิยมนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิห้องเพราะสามารถผันไฟฟ้าได้ดีในช่วงนี้ และบิสมัทเทลลูไรด์มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน $300^\circ C$ และมีข้อเสียคือ ราคาสูงและแสดงคุณสมบัติเป็นพิษที่อุณหภูมิมากกว่า $200^\circ C$ ทำให้บิสมัทเทลลูไรด์ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ส่วนสังกะสีออกไซด์นั้นสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสำนักงานเพื่อการพัฒนาคน เมื่อผู้ใดได้เห็นว่าเว็บไซต์ของสำนักงานพัฒนาคนมีเนื้อหาที่ไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เพราะมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก(1800 °C)[4] เสถียรที่อุณหภูมิสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น บิสมัทเทลลูไรด์มีช่วงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ส่วนสังกะสีออกไซด์ สามารถใช้ที่เกินกว่า 500°C และมีข้อดีเพิ่มเติมอีกคือ ราคาต่ำและไม่แสดงคุณสมบัติเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมหรือกล่าวได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงนั่นเอง แต่สังกะสีออกไซด์แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่ค่อยดีนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเจืออลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)[5-7] ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำให้เพิ่มค่าสภาพนำไฟฟ้าและลดค่าสภาพนำความร้อน เข้าไปแทนที่อะตอมของสังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์ ($Zn_{1-x}Al_xO$) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้น ในการเตรียมวัสดุตั้งต้นจะเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง[8]แบบแห้งเพราะเป็นวิธีที่สามารถเตรียมได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและสามารถเตรียมสารตั้งต้นได้ในปริมาณมาก และนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างและความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าจากออกไซด์เพื่อที่จะเลือกใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกได้มากที่สุดไปประยุกต์ใช้ประกอบเป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาใช้ประโยชน์ได้ การนำกระแสไฟฟ้าออกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้นั้นจำเป็นที่จะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าหรือเชื่อมระหว่างขั้วโลหะหรือแผ่นอิเล็กโทรดกับแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก โดยการเชื่อมขั้วไฟฟ้าที่ตั้นนั้นจะต้องไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาวัสดุเชื่อมและวิธีการเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมและประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและสร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นส่วนประกอบหลักของการสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900 องศาเซลเซียส

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สังเคราะห์และวิเคราะห์สารประกอบ $Zn_{1-x}Al_xO$ โดยที่ $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
2. พัฒนาการเชื่อมขั้วระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับขั้วโลหะหรือแผ่นอิเล็กโทรด และศึกษารอยต่อหลังการเชื่อม
3. ประกอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กสำหรับผลิตไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 30 – 900 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์และวิเคราะห์สารประกอบ $Zn_{1-x}Al_xO$ โดยที่ $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์วัสดุตั้งต้นเพื่อหาเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่เหมาะสมแล้วนำไปใช้สำหรับทำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
2. พัฒนาการเชื่อมขั้วหรือการเชื่อมระหว่างแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับขั้วโลหะหรือแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โดยพิจารณาจากปัจจัยค่าความต้านทานรอยต่อ เพื่อนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบหลักต้นแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
3. สรุปผลงานวิจัยที่ได้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
2. สังเคราะห์สารประกอบ $Zn_{1-x}Al_xO$ โดยที่ $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบแห้ง
3. ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างผลึกของวัสดุที่สังเคราะห์
4. ตรวจสอบความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกของวัสดุที่สังเคราะห์
5. ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก
6. พัฒนาการเชื่อมขั้วระหว่างแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับขั้วโลหะหรือแผ่นอิเล็กทรอนิกส์
7. ประกอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อนำไปสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กและทำการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูล
8. สรุปผลงานวิจัยและเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	ระยะปีที่ 1											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1												
2												
3												
ขั้นตอน	ระยะปีที่ 2											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
3												
4												
5												
6												
7												
8												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบแห้ง
2. องค์ความรู้ในกระบวนการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุ
3. พัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกประเภทออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้
4. องค์ความรู้กระบวนการประกอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
5. โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำขึ้นในงานนี้สามารถนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. องค์ความรู้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอที่มาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างของสารประกอบสังกะสีออกไซด์ (ZnO) และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) [9-13]

ประกอบด้วยปรากฏการณ์หลักสองปรากฏการณ์ คือปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์ ซึ่งทั้งสองปรากฏการณ์สามารถผันกลับกันได้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (seebeck effect)

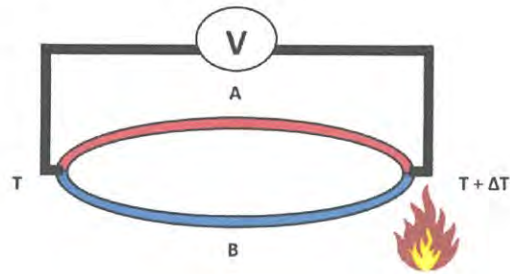
เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1821 โดย Thomas Johann Seebeck ซึ่งค้นพบว่าเมื่อให้ความร้อนที่บริเวณรอยต่อของตัวนำสองชนิดแสดงดังรูปที่ 2.1 แล้วที่รอยต่อด้านหนึ่งร้อนหรือมีอุณหภูมิสูงกว่า ($T + \Delta T$) รอยต่ออีกด้านหนึ่ง (T) จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของตัวนำทั้งสอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าพาหะหรืออิเล็กตรอนที่รอยต่อด้านที่อุณหภูมิสูงกว่า จะมีพลังงานจลน์สูงกว่าพาหะอิเล็กตรอนที่รอยต่ออีกด้านหนึ่ง ทำให้เคลื่อนที่ไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงทำให้เกิดความแตกต่างของพาหะอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อ หรืออาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ถ้าบริเวณรอยต่อของตัวนำมีความแตกต่างของอุณหภูมิจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นภายในตัวนำนั้น ซึ่งสัมประสิทธิ์ซีเบคจะถูกนิยามโดย

$$S_{AB} = \frac{dV}{dT} \quad (2.1)$$

และ

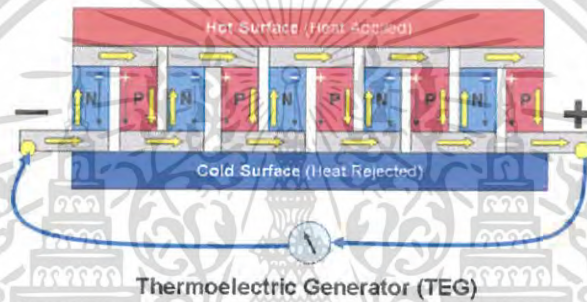
$$S_{AB} = \alpha_A + \alpha_B \quad (2.2)$$

โดยที่ S คือสัมประสิทธิ์ซีเบค (seebeck coefficient), V คือความต่างศักย์ไฟฟ้าและ T คืออุณหภูมิ



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค

เนื่องจากปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถผันจากพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นปรากฏการณ์ซีเบคจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากผลต่างอุณหภูมิ แสดงตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบค

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (peltier effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1834 โดย Jean Peltier ซึ่งค้นพบว่าถ้าผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในตัวนำสองชนิดที่เชื่อมต่อกัน แสดงดังรูป 2.3 จะมีผลทำให้ที่บริเวณรอยต่อด้านหนึ่งร้อนขึ้นหรือคายความร้อน (heat evolved) และรอยต่ออีกด้านหนึ่งเย็นลงหรือดูดความร้อน (heat absorbed) สำหรับอัตราการดูดความร้อนหรือคายความร้อนจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าและคุณสมบัติของตัวนำทั้งสอง ซึ่งเขียนในรูปของสมการได้ว่า

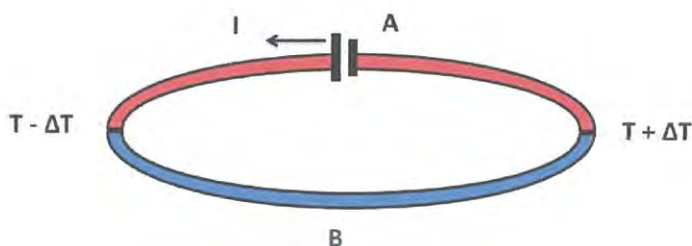
$$\dot{Q} = \Pi_{AB} I \quad (2.3)$$

และ

$$\Pi_{AB} = \Pi_A + \Pi_B \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ \dot{Q} คืออัตราการดูดหรือคายความร้อน, Π คือสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละวัสดุ และ I คือกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ปรัชการณณ์เพลเทียร์

เนื่องจากปรัชการณณ์เพลเทียร์เป็นปรัชการณณ์ที่สามารถผันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้โดยตรง ปรัชการณณ์เพลเทียร์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นแผ่นเพลเทียร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป นิยมนำไปประยุกต์ใช้เป็นตู้เย็นพกพาแสดงตัวอย่างแผ่นเพลเทียร์ดังรูปที่ 2.4

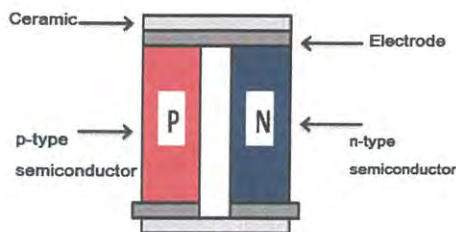


รูปที่ 2.4 แสดงภาพแผ่นเพลเทียร์

2.2 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)

โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหนึ่งชุดจะประกอบไปด้วยขาที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) หนึ่งขาและขาที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หนึ่งขามาต่ออนุกรมกันลักษณะการต่อจะแสดงดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

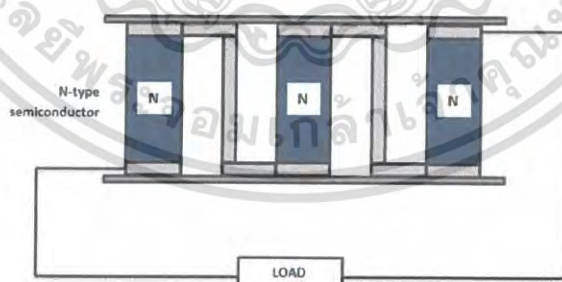


รูปที่ 2.5 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

ซึ่งโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนี้เองจะมีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิที่บริเวณรอยต่อซึ่งอธิบายโดยปรากฏการณ์ซีเบค (seebeck effect) และมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นการดูดความร้อนและการคายความร้อนที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอธิบายโดยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (peltier effect) สำหรับการนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้ประโยชน์สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้หรือผลต่างอุณหภูมิได้มากขึ้นแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.6 – 2.8

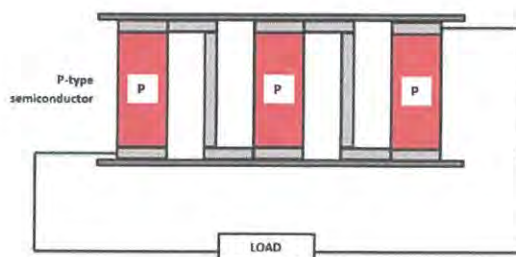


รูปที่ 2.6 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสองชนิด



รูปที่ 2.7 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสารกึ่งตัวนำ n-type เพียงชนิดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การต่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลแบบสารกึ่งตัวนำ p-type เพียงชนิดเดียว

2.3 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก [10, 14-15]

ในการพิจารณาประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะพิจารณาโดยการกำหนดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงไม่มีอัตราความร้อนตามปรากฏการณ์ทอมสัน
2. ความต้านทานรอยต่อระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก
3. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีพื้นที่หน้าตัดคงที่
4. ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้กับสิ่งแวดล้อม

และเมื่อพิจารณาสมการการนำความร้อนในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะคงตัวจะได้ว่า

$$\frac{J^2}{\sigma} + \nabla \cdot (k \nabla T) - \tau J_E \cdot \nabla T = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแส

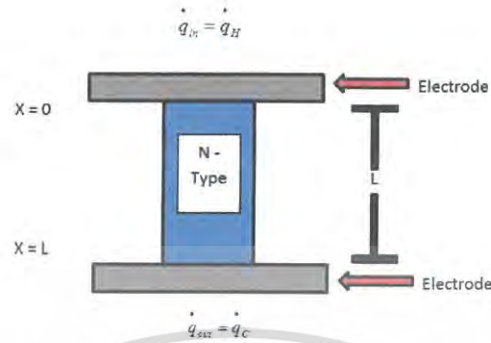
σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า

k คือ สภาพการนำความร้อน

τ คือ สัมประสิทธิ์ทอมสัน

โดยที่พจน์แรกทางซ้ายมือคือความร้อนต่อปริมาตรจุด พจน์ที่สองคือการนำความร้อนตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์และพจน์ที่สามทางซ้ายมือคือความร้อนของทอมสัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็นเท่านั้น ดังนั้นการพิจารณาค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์

โมอิล็กทริกจะขอพิจารณาเพียงอุปกรณ์เทอร์โมอิล็กทริกชนิดเอ็นเท่านั้น (สัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นลบ)



รูปที่ 2.9 แสดงอุปกรณ์เทอร์โมอิล็กทริกชนิดเอ็น

จากรูปที่ 2.9 กำหนดให้ที่ตำแหน่ง $x = 0$ คือตำแหน่งแห่งเซลล์ที่บริเวณด้านร้อนมีอุณหภูมิ T_H

กำหนดให้ที่ตำแหน่ง $x = L$ คือตำแหน่งแห่งเซลล์ที่บริเวณด้านร้อนมีอุณหภูมิ T_C

ดังนั้น $\Delta T = T_H - T_C$

กำหนดให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าซีเบค (V_s) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ซีเบค โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$V_s = s\Delta T \quad (2.6)$$

กำหนดให้มีกระแสไฟฟ้า (I_x) ไหลภายในเซลล์เทอร์โมอิล็กทริก

และ กำหนดให้ \dot{q}_H แทนอัตราพลักซ์ความร้อนที่ปลายด้านร้อน ($x = 0$) มีหน่วยเป็น $\frac{W}{m^2}$

เนื่องจากอัตราพลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคืออัตราพลักซ์ความร้อนเพลเทียร์ (Peltier heat) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในเซลล์เทอร์โมอิล็กทริกและอัตราความร้อนฟูเรียร์ (Fourier heat) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิในเซลล์เทอร์โมอิล็กทริก ซึ่งเขียนได้ในรูปของสมการดังนี้

$$\dot{q}_H = \dot{q}_\pi + \dot{q}_k \quad (2.7)$$

เมื่อ \dot{q}_π คือ เวกเตอร์ของอัตราพลักซ์ความร้อนเพลเทียร์มีหน่วยเป็น $\frac{W}{m^2}$

\dot{q}_k คือ เวกเตอร์ของอัตราพลักซ์ความร้อนฟูเรียร์มีหน่วยเป็น $\frac{W}{m^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนฟังก์ชันความร้อนในรูปของสเกลาร์คืออัตราความร้อน \dot{Q}_H โดยที่อัตราความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\dot{Q}_H &= A\bar{q}_H \\ \dot{Q}_H &= A(\dot{q}_\pi + \dot{q}_k) \\ \dot{Q}_H &= A\left(-ST_H J_E - \kappa \frac{dT}{dx}\Big|_{x=0}\right)\end{aligned}\quad (2.8)$$

เพื่อให้ทราบค่าอัตราความร้อนเราจำเป็นต้องทราบค่าผลเฉลยของอุณหภูมิ (T) ก่อน จากสมการที่ (2.5) จัดรูปใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบเซลล์เดียวใน 1 มิติที่มีหน้าตัด A จะได้

$$\kappa \frac{d^2 T}{dx^2} = \left(T \frac{ds}{dT}\right) J_E \cdot \sqrt{T} - \frac{1}{\sigma} J_E^2 \quad (2.9)$$

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ค่าสภาพการนำความร้อน สภาพการนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งและอุณหภูมิ จะได้

$$-\kappa \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = \rho J_E^2 \quad ; \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.10)$$

$$-\kappa \frac{dT(x)}{dx} = \rho J_E^2 x + B \quad (2.11)$$

$$-\kappa T(x) = \rho J_E^2 \frac{x^2}{2} + Bx + C \quad (2.12)$$

เมื่อค่า B และ C คือค่าคงที่ได้จากอินทิเกรต

พิจารณาว่า C โดยอาศัยสมการที่ (2.12) และเงื่อนไขขอบเขต $T = T_H$ ที่ตำแหน่ง $x = 0$

จะได้

$$-\kappa T_H = C \quad (2.13)$$

แทน ค่าสมการที่ (2.13) ในสมการที่ (2.12)

$$-\kappa T(x) = \rho J_E^2 \frac{x^2}{2} + Bx - \kappa T_H \quad (2.14)$$

พิจารณาว่า B โดยอาศัยสมการที่ (2.14) และเงื่อนไขขอบเขต $T = T_C$ ที่ตำแหน่ง $x = L$
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่นับผูกพันกับเงื่อนไขการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\begin{aligned}
 -\kappa T_C &= \rho J_E^2 \frac{L^2}{2} + BL - \kappa T_H \\
 B &= -\frac{\kappa}{L} |T_C - T_H| - \rho J_E^2 \frac{L}{2}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

แทนสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.11)

$$\begin{aligned}
 -\kappa \frac{dT(x)}{dx} &= \rho J_E^2 x - \frac{\kappa}{L} |T_C - T_H| - \rho J_E^2 \frac{L}{2} \\
 \frac{dT(x)}{dx} &= \rho \frac{J_E^2}{\kappa} \left(\frac{L}{2} - x \right) + \frac{T_C - T_H}{L} \\
 \frac{dT(x)}{dx} &= \frac{\rho J_E^2}{\kappa} \cdot \frac{L}{2} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) + \frac{T_C - T_H}{L}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

แทนค่า $K = \frac{\kappa A}{L}$ เมื่อ K คือค่าความร้อนภายในวัสดุ (Internal thermal conductance)

$$\begin{aligned}
 \frac{dT(x)}{dx} &= \frac{\rho J_E^2 A}{2K} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) + \frac{T_C - T_H}{L} \\
 \frac{dT(x)}{dx} &= \frac{RA}{2L} \cdot \frac{I^2}{A^2} \cdot \frac{A}{K} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) + \frac{T_C - T_H}{L} \\
 \frac{dT(x)}{dx} &= \frac{RI^2}{2KL} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) + \frac{T_C - T_H}{L}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

แทนค่าสมการที่ (2.17) ในสมการที่ (2.8)

$$\dot{Q} \Big|_{x=0} = -ST_H I + AK \left(\frac{T_C - T_H}{L} + \frac{RI^2}{2KL} \right) \tag{2.18}$$

$$\dot{Q} \Big|_{x=0} = -ST_H I + K(T_H - T_C) - \frac{1}{2} RI^2 \tag{2.19}$$

จากสมการที่ (2.19) จะพบว่าอัตราความร้อนไหลเข้าแท่งเทอร์โมอิเล็กทริกที่ปลายด้านร้อนจะประกอบไปด้วยสามพจน์โดยแต่ละพจน์มีความหมายดังนี้ พจน์ที่หนึ่งคือพจน์ของอัตราความร้อนเพลเทียร์ที่เกิดเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลที่ตำแหน่ง $x = 0$ พจน์ที่สองคือเทอมของอัตราความร้อนฟูเรียร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิโดยจะมีทิศทางไหลจากอุณหภูมิสูงไปอุณหภูมิต่ำ และพจน์ที่สามคือครึ่งหนึ่งของอัตราความร้อนจูล ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ใหม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{Q}_{In} = \dot{Q}_H = \dot{Q}_\pi + \dot{Q}_k - \frac{1}{2}\dot{Q}_J \quad (2.20)$$

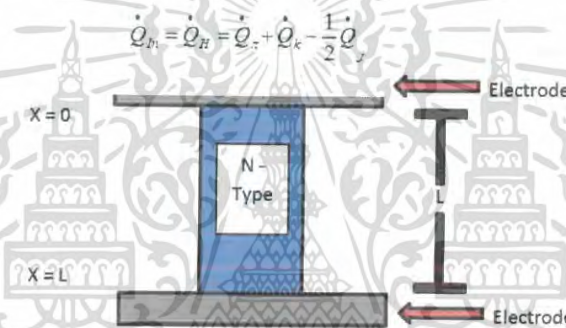
เมื่อ \dot{Q}_{In} คือ อัตราความร้อนไหลเข้าที่ด้านร้อน

\dot{Q}_π คือ อัตราความร้อนเพลเทียร์

\dot{Q}_k คือ อัตราความร้อนฟูเรียร์

\dot{Q}_J คือ อัตราความร้อนจูล

โดยที่เครื่องหมายบวก (+) แสดงถึงทิศทางการไหลเข้าของอัตราความร้อนและเครื่องหมายลบ (-) แสดงทิศทางการไหลออกของอัตราความร้อน



รูปที่ 2.10 แสดงอัตราความร้อนไหลเข้า

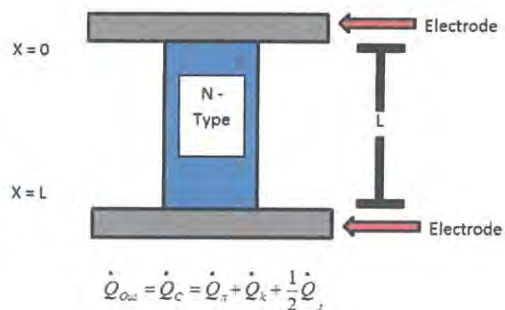
พิจารณาอัตราความร้อนที่ไหลออกด้านเย็น

ในการพิจารณาอัตราความร้อนที่ไหลออกด้านเย็นก็จะพิจารณาเช่นเดียวกันกับด้านร้อน ดังนั้นจะได้ว่า

$$\dot{Q}_{Out} = \dot{Q}_C = \dot{Q}_\pi + \dot{Q}_k + \frac{1}{2}\dot{Q}_J \quad (2.21)$$

$$\dot{Q}_{Out} = \dot{Q}_C = -ST_C I + K(T_H - T_C) + \frac{1}{2}RI^2 \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงอัตราการความร้อนไหลออก

ประสิทธิภาพของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบเซลล์เดี่ยวชนิดเอ็น

จากสมการประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2.23)$$

แทนค่า \dot{Q}_{in} และ \dot{Q}_{out} ในสมการที่ (2.23) โดยที่สัมประสิทธิ์ซีเบคมีเครื่องหมายเป็นลบ จะได้

$$\eta = \frac{-SI(T_H - T_C) + I^2R}{-ST_H I + \frac{KA}{L}(T_H - T_C) - \frac{1}{2}I^2R} \quad (2.24)$$

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบเซลล์เดี่ยววัสดุชนิดเอ็น

การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบเซลล์เดี่ยววัสดุชนิดเอ็นสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{Pro}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2.25)$$

เมื่อ P_{Pro} คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นได้ในเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

โดยที่ $P_{Pro} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้างต้นอัตราการความร้อนที่ไหลเข้าเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกด้านอุณหภูมิสูง

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_H = -ST_H I + K(T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R \quad (2.26)$$

อัตราการความร้อนไหลออกจากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกด้านอุณหภูมิต่ำ

$$\dot{Q}_{Out} = \dot{Q}_C = -ST_C I + K(T_H - T_C) + \frac{1}{2} I^2 R \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$P_{Pro} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{Out}$$

$$P_{Pro} = -SI(T_H - T_C) - I^2 R \quad (2.28)$$

พิจารณาความต่างศักย์ไฟฟ้าซีเบคที่วงจรเปิด (V_0)

$$V_0 = S(T_H - T_C) \quad (2.29)$$

และเมื่อต่อเข้ากับตัวต้านทานภายนอก (R_{Load})

$$V_{Out} = V_0 \frac{R_{Load}}{R + R_{Load}} \quad (2.30)$$

เมื่อ (V_{Out}) คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

แทนค่า $M = \frac{R_{Load}}{R}$ ในสมการที่ (2.30)

$$V_{Out} = V_0 \frac{M}{1 + M} \quad (2.31)$$

พิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าภายนอกเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก (I_{Out})

$$I_{Out} = \frac{V_0}{R + R_{Load}}$$

$$I_{Out} = \frac{V_0}{R(1 + M)} \quad (2.32)$$

จาก $P_{Pro} = I_{Out} V_{Out}$ จะได้

$$P_{Pro} = \frac{V^2}{R} \frac{M}{(1 + M)^2} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

$$\eta = \frac{P_{pro}}{Q_{in}}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{V_0^2}{R} \cdot \frac{M}{(1+M)^2} \right)}{\left(-ST_H I + K(T_H - T_C) + \frac{1}{2} I^2 R \right)}$$

$$\eta = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \left(\frac{M}{M + 1 + \frac{(1+M)^2}{ZT_H} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right)} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อ $\frac{1}{Z} = \frac{KR}{S^2} = \frac{\left(\frac{\kappa}{L} \right) \left(\frac{1}{\sigma A} \right)}{S^2} = \frac{\kappa}{S^2 \sigma}$

โดยที่ Z, S, σ และ κ คือ พิกเกอร์ออฟเมอริต,สัมประสิทธิ์ซีเบค,สภาพการนำไฟฟ้าและสภาพการนำความร้อน ตามลำดับจากสมการที่ (29) จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะประกอบด้วยสองส่วนคือ

1. เทอมประสิทธิภาพของคาร์โนต์

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{\Delta T}{T_H} \quad (2.35)$$

2. เทอมที่ขึ้นกับสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} \quad (2.36)$$

พิจารณาค่าประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max})

$$\eta_{max} = \frac{\partial \eta}{\partial M} = 0 = \eta_{carnot} \frac{M_\eta - 1}{M_\eta + \frac{T_C}{T_H}}$$

เมื่อ $M_\eta = \sqrt{1 + ZT_M}$

โดย $T_M = \frac{T_H - T_C}{2}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.34)

$$\eta_{\max} = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \left(\frac{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}{\sqrt{1 + ZT_M} + \frac{T_C}{T_H}} \right) \quad (2.37)$$

จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ $\left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right)$ และพจน์ $\sqrt{1 + ZT_M}$ มีค่าสูงสุด โดยเรียกค่า ZT ว่าไดเมนชันเลสฟิกเกอร์ออฟเมอร์ิต (Dimensionless figure of merit)

2.4 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric properties) [14, 16-18]

จากสมการที่ (2.37) จะพบว่าค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับค่า Dimensionless figure of merit โดยที่ค่า Dimensionless figure of merit มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกดังนี้

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2.38)$$

โดยที่ S คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, σ คือสภาพการนำไฟฟ้าและ κ คือสภาพการนำความร้อนทั้งสามตัวแปรนี้เรียกรวมว่าคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะมีค่ามากเมื่อสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพการนำไฟฟ้ามีค่ามากและสภาพการนำความร้อนมีค่าน้อย

2.4.1 สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ในบางครั้งอาจบอกในรูปของสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) สมการอย่างง่ายที่ใช้แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าสภาพนำไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ 2.39

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nq\mu \quad (2.39)$$

เมื่อ σ, ρ, n และ μ คือ สภาพการนำไฟฟ้า, สภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.39) แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่ามากหรือค่าน้อยขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration) และสภาพคล่องของพาหะ (mobility) ซึ่งจะขอล่าวถึงปัจจัยทั้งสองเพียงเล็กน้อยดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration)

หากพิจารณาว่าวัสดุของแข็งอยู่ในบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมเป็นอุณหภูมิต่ำที่ค่าหนึ่งประจุพาหะในแถบนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ของฉนวนและสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนตัวอย่างไม่เป็นระเบียบทิศทางไม่แน่นอนด้วยพลังงานจลน์ค่าหนึ่งที่มีค่าขึ้นอยู่กับสถานะที่พาหะนั้นๆ อยู่ จะได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบพลังงานระหว่างพลังงาน E และ $E + dE$ มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสถานะ (density of state) และความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน (probability of occupation of a state of energy) ในช่วงระดับพลังงาน E และ $E + dE$ ดังนี้

$$n = \int_0^{\infty} dn = \int_0^{\infty} p(E)g(E)dE \quad (2.40)$$

เมื่อ $p(E)$ คือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในช่วงระดับพลังงาน E และ $E + dE$

$g(E)$ คือความหนาแน่นของสถานะพลังงานในช่วงระดับพลังงาน E และ $E + dE$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยสมการดังนี้

$$n = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \eta^{\frac{3}{2}} \quad (2.41)$$

เมื่อ $\eta = \frac{E_f}{kT}$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของพาหะจะถูกกำหนดด้วยความกว้างของแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและอุณหภูมิเป็นสำคัญ

2. สภาพคล่องของพาหะ (mobility)

ค่าสภาพคล่องของพาหะจะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิง (scattering effect) ซึ่งแบ่งได้ออกเป็นสองส่วนสำคัญคือ การกระเจิงกับแลตทิซของอะตอมที่กำลังสั่นรอบจุดสมดุลเนื่องจากพลังงานความร้อน และการกระเจิงกับอะตอมสารเจือที่ตั้งใจหรือไม่ตั้งใจเติมเข้าไปก็ตาม ซึ่งช่วงเวลาที่เคลื่อนที่โดยไม่เกิดการกระเจิงเรียกว่า ช่วงอายุเฉลี่ยของพาหะ (relaxation time, τ) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\mu = \frac{q\tau}{m} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สัมประสิทธิ์ซีเบค (seebeck coefficient)

สัมประสิทธิ์ซีเบคจะมีค่าสัมพันธ์กับระดับพลังงานเฟอร์มิในวัสดุและกลไกการกระเจิงของประจุพาหะเป็นสำคัญ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการในเทอมของเฟอร์มิอินทิกรัล ($F_r(\eta)$) ได้ดังนี้

$$S = -\frac{k}{e} \left[-\eta + \frac{(b + 5/2)F_{b+3/2}(\eta)}{(b + 3/2)F_{b+1/2}(\eta)} \right] \quad (2.43)$$

โดยที่ b คือค่าคงที่ที่ได้จากการพิจารณากลไกการกระเจิง

หรือเขียนในรูปสมการของ Mott ได้ว่า

$$S = \frac{c_e}{n} + \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left(\frac{\partial \ln \mu(\varepsilon)}{\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_F} \quad (2.44)$$

โดยที่ n , $\mu(\varepsilon)$, c_e และ k_B คือ ความเข้มข้นของพาหะ, สภาพการเคลื่อนที่ได้ของพาหะสัมพันธ์กับพลังงาน, ความจุความร้อนจำเพาะ และค่าคงที่ของโบลต์ซ์มานน์ ตามลำดับ

2.4.3 สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการนำความร้อนภายในวัสดุเนื่องจากมีผลต่างหรือเกรเดียนต์อุณหภูมิ ในวัสดุของแข็งกลไกการนำความร้อนประกอบส่วนสำคัญสองส่วนคือการสั่นของโครงผลึกหรือการสั่นของแลตทิซหรือโฟนอน และการนำความร้อนโดยพาหะอิสระ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_l \quad (2.45)$$

เมื่อ κ คือสภาพการนำความร้อนทั้งหมด, κ_e คือสภาพการนำความร้อนเนื่องจากพาหะหรืออิเล็กตรอนและ κ_l คือสภาพการนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของโครงผลึกหรือโฟนอน

2.4.3.1 สภาพการนำความร้อนเนื่องจากพาหะอิสระ (Electronic thermal conductivity)

เป็นการพิจารณาการนำความร้อนเนื่องจากอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ Wiedmann-Franz ได้ดังนี้

$$\kappa_e = L\sigma T \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.2 สภาพการนำความร้อนเนื่องจากโฟนอน (Lattice thermal conductivity)

สภาพการนำความร้อนประเภทนี้สามารถประมาณค่าได้จากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (classical kinetic theory of gases) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ยของโฟนอน (\bar{v}) ระยะเฉลี่ยปลอดการชน (\bar{l}) และความร้อนจำเพาะ (C_v) ซึ่งแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

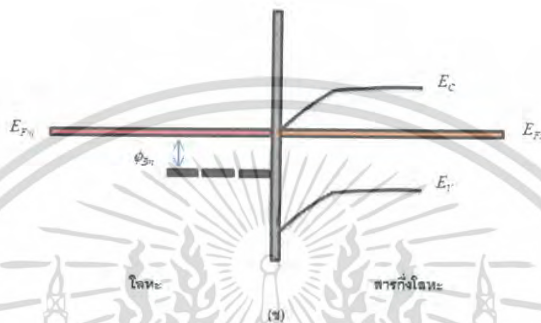
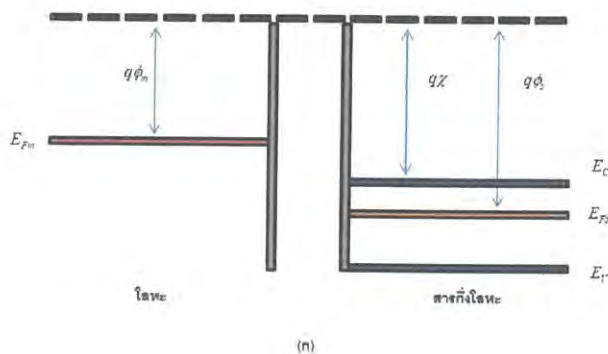
$$\kappa_l = \frac{1}{3} C_v \bar{v} \bar{l} \quad (2.47)$$

2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยอาศัยหนึ่งในปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบค เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจะประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวนมากที่ต่อกันด้วยการต่อแบบอนุกรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type) โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจะมีค่าประมาณ 5-10 % เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อดีมากมาย เช่น ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ไม่ก่อให้เกิดเสียงดังรบกวน มีความทนทาน มีระยะเวลาการใช้งานที่นาน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.6 รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ [19]

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอะลูมิเนียมเจอร์เมเนียมในสังกะสีออกไซด์ในสังกะสีออกไซด์จัดเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกหรือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกล่าวคือมีพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนหรือประจุลบ การที่จะนำกระแสไฟฟ้าจากแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกออกมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้นั้นจำเป็นต้องมีส่วนประกอบสำคัญที่จะนำประจุออกมาเรียกอุปกรณ์นี้ว่า สายนำกระแส (lead wire) ซึ่งก็คือลวดโลหะตัวนำนั่นเอง จากที่ทราบกันคืออยู่แล้วโดยทั่วไปว่าโลหะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นการนำลวดโลหะตัวนำมาใช้เป็นรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำในที่นี้คือแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกก็อาจจะมีพาหะประจุข้ามรอยต่อหลังจากการสัมผัส โดยพาหะประจุอาจจะเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำหรือเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะและสารกึ่งตัวนำ จากการแพร่ของพาหะประจุข้ามรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำนี้จะทำให้เกิดประจุประจุที่มีที่บริเวณรอยต่อเป็นช่วงการพ้องสนามไฟฟ้าภายในและก่อให้เกิดกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อ (potential barrier) เนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้เป็นชนิดเอ็น จึงจะขอกกล่าวถึงรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเท่านั้น



รูปที่ 2.12 แสดงรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส

จากรูปที่ 2.12 แสดงลักษณะรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นรอยต่อที่ไม่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นได้เมื่อฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ϕ_s) มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) จากรูป (ก) แสดงก่อนการสัมผัสกันของโลหะและสารกึ่งตัวนำและ(ข) แสดงรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำหลังสัมผัสกัน รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำในกรณีนี้ภายหลังการสัมผัสกัน อิเล็กตรอนบางส่วนจะเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเกิดการปรับระดับจนมีพลังงานเท่ากันและเกิดเป็นกำแพงศักย์ (V_{bi}) ขนาดเล็กซึ่งพาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่าย

จากรูปจะได้ว่ากำแพงศักย์ (barrier height) มีค่า

$$\phi_{bn} = |\phi_m - \chi| \tag{2.48}$$

โดยที่ ϕ_{bn} คือ ขนาดกำแพงศักย์

ϕ_m คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ

χ คือ ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน

และค่าศักย์แสดงความชันสถานะ (ϕ_n) มีค่า

$$\phi_n = |\phi_s - \chi| \tag{2.49}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนได้ว่า

$$\phi_n = \frac{1}{q}(E_C - E_{F_s})$$

$$\phi_n = \frac{1}{q}((E_C - E_i) - (E_{F_s} - E_i))$$

จากกรณีนอนตีเจนเนอเรตแทนค่า $n_0 = n_i e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}}$ เมื่อ n_0 มีค่าประมาณ N_D จะได้ว่า

$$\phi_n = \frac{1}{q} \left(\frac{E_g}{2} - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (2.50)$$

ทำให้ได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นภายในรอยต่อ

$$V_{bi} = \phi_{bn} - \phi_n$$

$$V_{bi} = \phi_m - \chi - \frac{1}{q} \left(\frac{E_g}{2} - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (2.51)$$

โดยที่ V_{bi} , E_g , k , N_D และ n_i คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ, ความกว้างของแถบพลังงาน, ค่าคงที่โบลซ์มัน, ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้และความหนาแน่นของพาหะอินทริกซิก

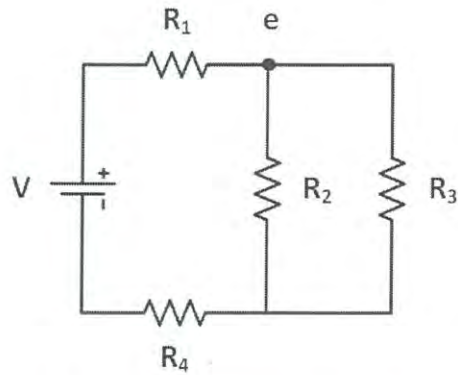
2.7 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Law)

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงกฎของเคอร์ชอฟฟ์ซึ่งประกอบด้วยสองข้อดังนี้

1. กฎของกระแส (Kirchoff's Current Law)
2. กฎของแรงดันไฟฟ้า (Kirchoff's Voltage Law)

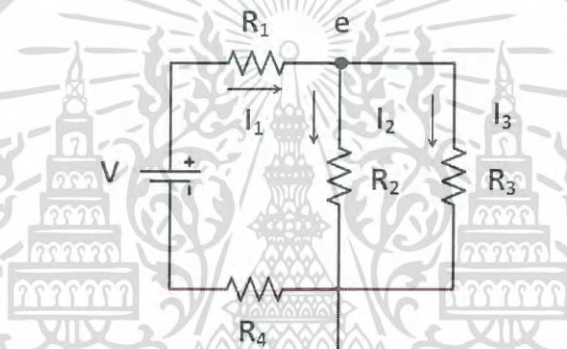
ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำกฎข้อที่หนึ่งของเคอร์ชอฟฟ์มาใช้ในการประยุกต์เพื่อหาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดเฉพาะกฎข้อที่หนึ่งเพียงเท่านั้น

กฎของกระแส (Kirchoff's Current Law) ซึ่งเป็นกฎที่กล่าวว่าผลรวมของกระแสไฟฟ้า ณ จุดใดๆจุดหนึ่งในวงจรไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงตัวอย่างดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.13 จะทำการพิจารณาที่จุด e กำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ารอบจุด e และกำหนดจุดที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงการกำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.14 จะได้ว่า

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (2.52)$$

หรือ

$$\frac{e-V}{R_1} = \frac{e}{R_2} + \frac{e}{R_3} \quad (2.53)$$

เมื่อ e คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด e

R_1 คือ ความต้านทานตัวที่ 1

R_2 คือ ความต้านทานตัวที่ 2

R_3 คือ ความต้านทานตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide) [19, 20-21]

-โครงสร้างผลึก

โดยส่วนใหญ่แล้วหมู่ IIB-VIB ของโลหะทรานซิชันที่ประกอบเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) มักจะมีโครงสร้างเป็นแบบ zinc blende และ wurtzite แต่สำหรับ ZnO แล้วโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างแบบ wurtzite ซึ่งมีแบบที่แต่ละไอออนประจุบวก(cation)จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุลบ(anion) จำนวนสี่ตัวที่มุมของเตตระฮีดรอลหรือในทางกลับกันไอออนลบถูกล้อมรอบด้วยไอออนบวกจำนวนสี่ตัวเช่นเดียวกัน ส่วนโครงสร้างแบบ zinc blende จะมีโครงสร้างคล้ายเพชรแต่แตกต่างกันที่ basic lattice จะอยู่ที่ $(0,0,0)$ และ $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ ซึ่งสองตำแหน่งนี้จะ เป็น basic lattice คนละชนิดกัน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแบบ wurtzite (ซ้าย) โครงสร้าง zinc blende (ขวา)

-เลขออกซิเดชันของ (oxidation number) $Zn = +2$ และเลขออกซิเดชันของ $O = -2$

-ค่าคงที่ผลึก (lattice parameter) $a = 3.2475 - 3.2501$ อังสตรอม และ $c = 5.2042 - 5.2075$ อังสตรอม

-อัตราส่วนค่าคงที่ผลึก $\frac{c}{a} = 1.633$

-สภาพการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (electrical conductivity) = $2.53 \frac{S}{cm}$

-สภาพการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง (thermal conductivity) = $28 \frac{W}{mK}$

-สัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิห้อง (seebeck coefficient) = $-212 \frac{\mu V}{K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ความกว้างของแถบพลังงาน (energy gap) = 3.44 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 0 K และ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 300 K

-จุดหลอมเหลว (melting point) = 1,800 องศาเซลเซียส

-ความหนาแน่น (density) = $5.61 \frac{g}{cm^3}$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [22-26]

วัตถุประสงค์หลักของงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยสองประการคือ การหาและใช้กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างง่ายที่สุดเพื่อให้สามารถสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว และการพัฒนาการเชื่อมขั้วหรือการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก(สารกึ่งตัวนำ)กับแผ่นอิเล็กโทรด(โลหะ) เพื่อประกอบเป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้ไปใช้เป็นส่วนประกอบของต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงอุณหภูมิสูง(30 – 900 องศาเซลเซียส) จากที่ได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกันและเนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายการนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 – 900 องศาเซลเซียสดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นเพราะว่าสังกะสีออกไซด์เป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,800 องศาเซลเซียส ไม่มีคุณสมบัติที่เป็นพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูกและที่สำคัญคือสังกะสีออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็นอยู่แล้วเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกหรือการขาดของออกซิเจนทำให้เกิดพาหะอิสระอิเล็กตรอนขึ้น จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกแล้วว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีจะต้องมีค่า dimensionless figure of merit สูงหรือค่าสภาพการนำไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าสูงและค่าสภาพการนำความร้อนมีค่าต่ำ และเนื่องจากสังกะสีออกไซด์มีคุณสมบัติเหล่านี้ไม่ค่อยดีนัก ทำให้มีงานวิจัยมากมายพยายามปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีต่างๆมากมายทั้งการจำลองในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ เช่น M. Khuli และคณะ [22]ได้ทำการจำลองการปรับปรุงคุณสมบัติของสังกะสีออกไซด์โดยการเจือธาตุหมู่ที่สาม เช่น อลูมิเนียม (Al) , แกลเลียม (Ga) และอินเดียม (In) ลงไปและพบว่าผลการเจือธาตุหมู่สามเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างสังกะสีออกไซด์จะไม่ทำให้โครงสร้างของสังกะสีออกไซด์เปลี่ยนแปลงแต่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางแสงและสภาพการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้นได้เป็นอย่างมาก, T. Tsubota และคณะ [23]ได้ทำการเจือร่วมระหว่างแมกนีเซียมกับอลูมิเนียม พบว่าคุณสมบัติค่าสภาพการนำไฟฟ้าและสภาพการนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้นแต่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียม เมื่อศึกษาเพิ่มเติมพบว่ามีความจำเป็นที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของสังกะสีออกไซด์

โดยการเจือธาตุโลหะและโลหะทรานซิชันต่างๆเข้าไป และจากการพิจารณาของผู้ทำวิทยานิพนธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า การเจือธาตุโลหะหมู่ที่สามในปริมาณเล็กน้อยจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสังกะสีออกไซด์ได้ดีที่สุด ดังนั้นในขั้นต้นของงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกเจืออลูมิเนียมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเป็นหลัก การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น H.Cheng และคณะ [24] ได้ทำการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์เจืออลูมิเนียมด้วยวิธีการทางพลาสมา และเผาแข็งด้วยกระบวนการอัดร้อน, K.F. Ca และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบเปียก, S. Jantrasee และคณะ [26] ได้ทำการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล จากข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งในงานวรรณกรรมนี้จะสังเคราะห์สังกะสีเจืออลูมิเนียมด้วยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบแห้งทั้งนี้เพราะวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบแห้งเป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่าย ขั้นตอนไม่ยุ่งยากและที่สำคัญสามารถเตรียมวัสดุในปริมาณมากได้ นอกจากการใช้กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก รวดเร็วและมีคุณภาพแล้ววัตถุประสงค์หลักของงานวิทยานิพนธ์นี้ยังประกอบด้วยอีกหนึ่งประการคือการพัฒนาการเชื่อมต่อเพื่อให้ได้กระบวนการเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมเพื่อประกอบระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกและแผ่นอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกรวมกันว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้ไปใช้เป็นส่วนประกอบของต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การเชื่อมต่อที่นั่นสายนำกระแสจะต้องไม่มีผลต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการพัฒนาการเชื่อมต่อด้วยการพิจารณาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อเพื่อให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาประยุกต์ใช้ได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น คุณสมบัติเชิงโครงสร้าง และคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก รวมทั้งการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ การทำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและการวัดกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

3.1 วิธีการสังเคราะห์ $Zn_{1-x}Al_xO$

สำหรับงานวิจัยนี้วิธีการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (classical solid state reaction) แบบแห้งซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถทำได้ง่ายเพียงไม่กี่ขั้นตอน ปลอดภัยและสามารถเตรียมวัสดุตั้งต้นได้ในปริมาณมาก ในงานนี้วัสดุที่เลือกใช้เริ่มต้นคือสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ซึ่งเป็นโลหะประเภทออกไซด์ มีข้อดีคือ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงและมีจุดหลอมเหลวที่สูงถึง 1,800 องศาเซลเซียสซึ่งข้อดีในส่วนนี้เองที่ทำให้สังกะสีออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่สังกะสีออกไซด์มีข้อเสียคือจะแสดงคุณสมบัติที่ไม่ค่อยดีทางเทอร์โมอิเล็กทริกในงานนี้จึงได้ทำการเจืออลูมิเนียมจากอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ลงไปเพื่อให้อะตอมของอลูมิเนียมเข้าไปแทนที่อะตอมของสังกะสีเพื่อปรับปรุงให้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกดีขึ้นสำหรับปริมาณการเจือลงไปสามารถคำนวณจากมวลโมเลกุลโดยอาศัยสมการที่ (3.1) โดยที่ x แทนปริมาณการเจือและ $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ และ 0.05



การสังเคราะห์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมสารตั้งต้น

ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณโดยอาศัยการคำนวณมวลโมเลกุลเทียบบัญญัติไตรยางศ์และชั่งน้ำหนักสารตั้งต้นตามปริมาณที่ต้องการ โดยใช้ผงสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับ 99% จาก Ajax Finechem และใช้อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับ 98% จาก Sigma Aldrich



รูปที่ 3.1 แสดงสารตั้งต้นสังกะสีออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์

2. การบด

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำสารตั้งต้นที่ได้จากการซึ่งรวมแล้วเป็นจำนวน 4 กรัมมาผสมรวมกันในครกอาเกต (agate mortar) แล้วทำการบดเป็นเวลา 40 นาทีหรือจนสารตั้งต้นเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.2 แสดงสารตั้งต้นผสมรวมกันในครกอาเกต

3. การเผาครั้งที่ 1

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนเผาสารเพื่อให้ได้เฟสตามที่ต้องการโดยจะทำโดยการนำผงละเอียดที่ได้จากการบดมาใส่ถ้วยอลูมินาแล้วเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 แสดงถ้วยอลูมินาสำหรับใช้เผาสารที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การอัดขึ้นรูป

หลังจากที่ได้สารตั้งต้นตามเฟสที่ต้องการแล้วก็จะนำมาอัดขึ้นรูปโดยการใส่สารประมาณ 1.5 กรัม (สำหรับการอัดเป็นเม็ดเพื่อส่งวัดคุณสมบัติต่างๆ) ลงในบล็อกอัดสาร แล้วอัดด้วยไฮดรอลิก (hydraulic) ที่ความดัน 2 MPa และค้างไว้ประมาณ 2 นาที



รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกอัดสารและไฮดรอลิก

5. การเผาแข็ง (sintering)

ขั้นตอนจะนำเม็ดสารที่ได้จากการอัดไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อให้สารมีความแข็งและมีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 3.5 แสดงเตาที่ใช้ในการเผา



รูปที่ 3.6 แสดงแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก Al-doped ZnO หลังการเผาแข็ง

6. ส่องวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การประกอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric module)

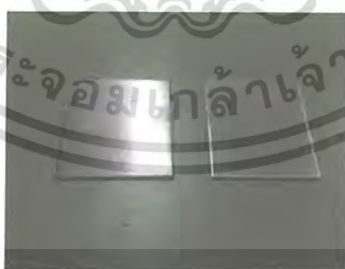
ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างมากในงานนี้ซึ่งก็คือการประกอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อนำมาทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ที่ผลิตได้

สำหรับขั้นตอนการทำจะเหมือนกับการสังเคราะห์วัสดุ แต่จะต่างกันที่ขั้นตอนการอัดคือจะใช้สารในการอัดต่อหนึ่งโมดูลเป็นจำนวน 8 กรัม และอัดที่ความดัน 3 MPa และค้างไว้ประมาณ 4 นาที จากนั้นนำไปเผาแข็งในอากาศที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 แสดงแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่หลังอัดขึ้นรูป

ลำดับต่อไปจะเป็นการต่อขั้วอิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้าให้กับเม็ดสารที่ผ่านการเผามาแล้ว โดยขั้วอิเล็กโทรดที่เลือกใช้คือ stainless steel เพราะสามารถใช้งานได้ที่ย่านอุณหภูมิสูง มีความทนทาน และเกิดออกไซด์ได้ยาก โดย stainless steel ที่ใช้จะเป็นการออกแบบให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกับการใช้งานในการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับการต่อขั้วอิเล็กโทรดจะทำได้โดยการวางเม็ดสารที่เผาแล้วลงในร่องของ stainless steel จากนั้นจะนำไปหลอมให้แน่นด้วยเครื่องอินดักชันจากบริษัท CEP ซึ่งการหลอมด้วยเครื่องอินดักชันนอกจากจะทำให้ติดแน่นแล้วยังจะได้ประโยชน์ในการทำให้เม็ดสารแข็งแรงขึ้นด้วย



รูปที่ 3.8 แสดงขั้วอิเล็กโทรด stainless steel 316S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.10 แสดงโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

3.3 กระบวนการวิเคราะห์ [27-28]

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และหนึ่งในคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่วัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานและวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคด้วยเครื่องมือที่ประกอบขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ

3.3.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องยี่ห้อ SHIMADZU/JAPAN รุ่น XRD-6100 โดยวัดจากมุม $2\theta = 10 - 80$ องศา เพิ่มครั้งละ 0.02 องศาต่อวินาที เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์เป็นอย่างมาก เช่น ในการวิเคราะห์จะไม่สร้างความเสียหายให้กับตัวอย่างทำให้สามารถนำตัวอย่างกลับมาใช้ใหม่ได้ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง

คลื่นรังสีเอกซ์ (X-ray waves) เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นมากๆ มีหลักการทำงานคือ คลื่นรังสีเอกซ์จะพุ่งไปตกกระทบที่ระนาบของผลึกซึ่งจะเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละวัสดุโดยอาศัยหลักการของแบรกก์ที่ว่ามุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ข้อมูลในส่วนตรงนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของผลึกโดยอาศัยสมการที่ (3.2) และเนื่องจากสังกะสีออกไซด์ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลจึงจำเป็นต้องใช้สมการที่ (3.3) และผลลัพธ์ของเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถนำไปใช้หาองค์ประกอบที่ไม่ทราบค่าทางเคมีได้อีกด้วย

$$2d_{hh} \sin \theta = n\lambda \quad (3.2)$$

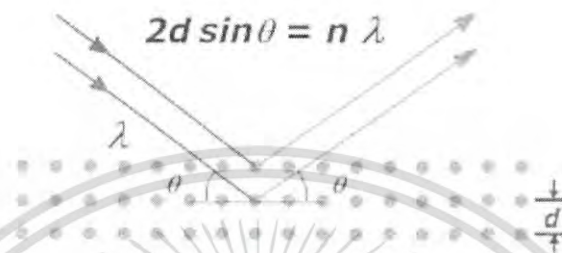
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือมุมสะท้อนจากระนาบตามกฎของแบรกก์

n คือลำดับการเลี้ยวเบน ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ คือความยาวคลื่น



รูปที่ 3.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ a, c และ hkl คือค่าคงที่ของโครงผลึก, ค่าคงที่ของโครงผลึกและดัชนีมิลเลอร์ ตามลำดับ

3.3.2 LZT meter

LZT meter เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดหาค่า dimensionless figure of merit (ZT) ได้จากการวัดเพียงครั้งเดียว จากสมการ $ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}$ โดยที่ S คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค σ คือค่าสภาพการนำไฟฟ้า T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์และ κ คือค่าสภาพการนำความร้อนนั้นหมายความว่าเราจะได้ค่าข้างต้นจากการวัดเพียงครั้งเดียวซึ่งรายละเอียดของการได้มาแต่ละค่านี้จะขอกกล่าวถัดไปในภายหลัง ทำให้ LZT meter เป็นเครื่องมือวัดที่มีประโยชน์และมีความแม่นยำเป็นอย่างมากเพราะการได้ค่าจากการวัดเพียงครั้งเดียว นั่นคือตัวอย่างที่เราวัดก็คือตัวอย่างเต็ม รูปทรงเต็มซึ่งเครื่อง LZT meter นี้การเตรียมตัวอย่างที่จะนำไปวัดสามารถเตรียมได้ทั้งเป็นเม็ดยาและแท่งสี่เหลี่ยม เจือไนของสิ่งแวดล้อมเหมือนเดิม เช่น อากาศภายในห้องวัด

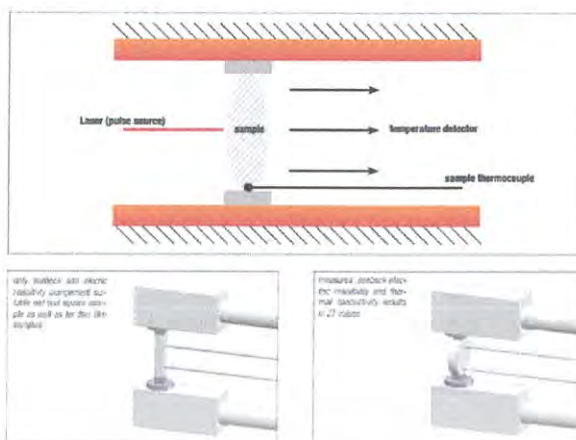


รูปที่ 3.12 LZT meter

ในลำดับต่อไปจะขอกล่าวถึงการได้มาแต่ละค่าของสัมประสิทธิ์ซีเบค (seebeck coefficient) ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)

1. สัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.17 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ของการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากรูปจะเห็นได้ว่าเราสามารถเตรียมตัวอย่างได้ทั้งรูปแบบเป็นเม็ดยาและเป็นแท่งสี่เหลี่ยม การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะได้มาจากคำนวณตามสมการ $S = \frac{-dU}{dT}$ โดยที่ dU คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและ dT คือผลต่างอุณหภูมิซึ่งวิธีการวัดนี้เรียกว่า static dc method การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทำได้โดยการจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) จากความสัมพันธ์ $R = \frac{dV - dE}{I}$ โดยที่ dV คือค่าความต่างศักย์ตกคร่อม dE คือ thermo electromotoric force และ I คือค่ากระแสไฟฟ้า และเมื่อได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแล้วจะทำให้หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์ $\rho = \frac{R \cdot A}{d}$ โดยที่ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างและ d คือค่าระยะห่างระหว่างเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งท้ายสุดแล้วเราจะได้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ซึ่งวิธีการวัดนี้เรียกว่า four-terminal method

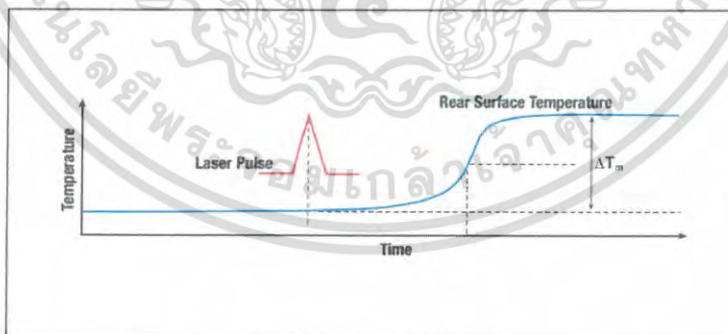


รูปที่ 3.13 การจัดวางเครื่องมือสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพการนำไฟฟ้า, สภาพการนำ

ความร้อน

2. สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

การได้มาซึ่งค่าสภาพการนำความร้อนจะได้อาจได้มาจากการวัดค่า thermal diffusivity โดยการวางตำแหน่งของตัวอย่างจะเหมือนกับการวางตำแหน่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากนั้นจะใช้โปรแกรมในการสังเคราะห์คลื่นพลังงานออกไป (energy pulse, laser or xenon flash) ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นจะทำการวัดค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา ซึ่งค่านี้เองจะเรียกว่าค่า thermal diffusivity (α) จากนั้นจะคำนวณหาค่าสภาพการนำความร้อนจากความสัมพันธ์ $\lambda(T) = \alpha(T) \cdot C_p(T) \cdot \rho(T)$ โดยที่ C_p คือค่า specific heat และ ρ คือค่าความหนาแน่น



รูปที่ 3.14 การวัดค่า thermal diffusivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า [19, 29-30]

จากที่ทราบแล้วว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือวัสดุที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เมื่อเกิดผลต่างอุณหภูมิที่บริเวณรอยต่อทั้งสองด้าน แต่ในการนำกระแสไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาใช้ประโยชน์ได้นั้นในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าหรือต่อขั้วอิเล็กโทรดเข้ากับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ปลายทั้งสองด้าน เพื่อให้การนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุดขั้วไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องไม่มีผลกระทบต่อกรนำไฟฟ้าหรือกล่าวได้ว่ามีการนำไฟฟ้าแบบเชิงเส้นซึ่งรอยต่อที่ดีคือรอยต่อที่มีค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อต่ำเพื่อให้พาหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่าย

3.4.1 ความต้านทานรอยต่อ (contact resistant : R_c)

ในการพิจารณาค่าความต้านทานรอยต่อจะพิจารณาจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงแผนภาพการทดสอบดังรูปที่ 3.20 (ก) และเพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้นจะแสดงรูปแบบการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานรอยต่อในรูปของวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.15 แสดง (ก) แผนภาพและ (ข) วงจรการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ

ในการคำนวณค่าความต้านทานรอยต่อ จะคำนวณโดยอาศัยวิธีการ Node method โดยจะพิจารณาที่จุด A โดยกำหนดให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ e แสดงสมการดังนี้

$$\frac{(e - V(\alpha, T))}{R_2 + R_3} + \frac{e}{R_4} = 0 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $R_2 + R_3$ การศึกษา R_4 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$e - V(\alpha, T) = I(R_c + R_E) \quad (3.5)$$

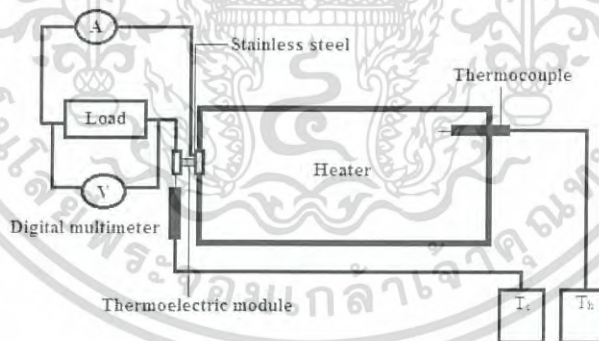
จาก (3.4) และ (3.5) จะได้

$$R_c = -\left(\frac{V(\alpha, T)}{I} + R_E + R_L\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ V , I , R_E และ R_L คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ความต้านทานของแผ่นอิเล็กโทรดและความต้านทานโหลด ตามลำดับ

3.5 การทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

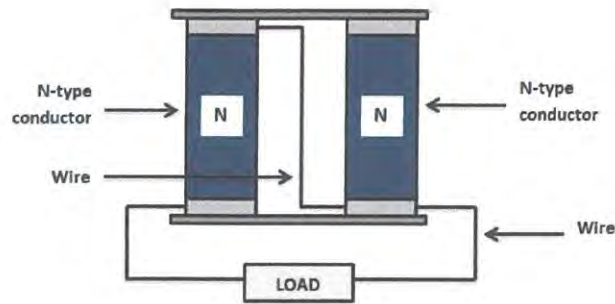
หลังจากที่ได้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric module) แล้ว ก็จะทำทดสอบโดยการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าขาออก (output power) โดยแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการทดสอบคือเตาไฟฟ้าและทดลองในช่วงอุณหภูมิ 30 – 900 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิด้านเย็นด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (k – type thermocouple) และทำการเก็บข้อมูลโดยใช้มัลติมิเตอร์ (multimeter) แสดงแผนภาพที่ทำการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.16 แสดงแผนภาพที่ทำการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบเพียงหนึ่งตัวของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และขั้นตอนที่สองจะทำการทดสอบสองโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการนำมาต่ออนุกรมกันโดยตัวอย่างการต่ออนุกรมของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเดียวกันจะแสดงในรูปที่ 3.22

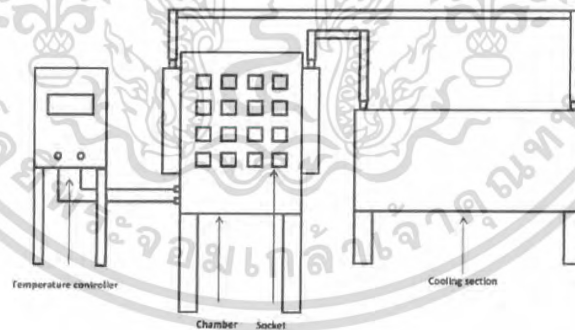
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงการต่ออนุกรมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเดียวกัน

3.6 การทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าขาออกที่โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้แล้ว ก็จะทำการศึกษาที่สามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดไปประยุกต์ใช้ในการสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยสี่ส่วนสำคัญคือ โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ห้องทำอุณหภูมิ (chamber) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) และ ส่วนทำความเย็น (cooling part) โดยจะทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส แสดงภาพจำลองการทดสอบดังรูป 3.19



รูปที่ 3.18 แสดงการทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

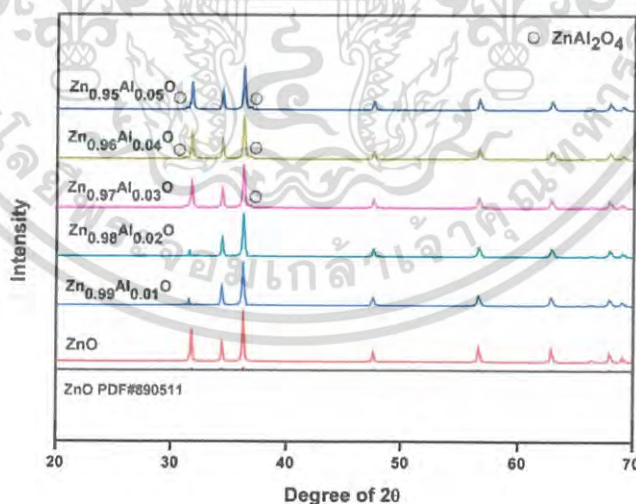
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยของการสังเคราะห์วัสดุ $Al-doped ZnO$ ซึ่งประกอบด้วยผลของการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพการนำไฟฟ้า และค่าสภาพการนำความร้อน นำผลเสนอผลการวิจัยในส่วนของการพัฒนาการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วโลหะ และท้ายสุดจะนำเสนอผลการทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก

4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง

ในหัวนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุสารประกอบ $Zn_{1-x}Al_xO$ โดยที่ $x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อทำการศึกษาว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์จะมีผลต่อโครงสร้างอย่างไร มีผลต่อค่าคงที่โครงสร้างหรือไม่ โดยที่ค่าคงที่โครงสร้างจะได้อาจมาจากการคำนวณ และในการแสดงผลจะแสดงโดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสังกะสีออกไซด์ PDF#890511 แสดงผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง $Al-doped ZnO$

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่ากราฟของตัวอย่างที่ทำการเจืออลูมิเนียมจะตรงกับกราฟมาตรฐานของสังกะสีออกไซด์ นั่นคือการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์จะไม่ทำให้โครงสร้างของสังกะสีออกไซด์เปลี่ยนแปลงกล่าวคือมีโครงสร้างแบบเดิมคือเวอร์ตไซต์ แต่ในกรณีของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Zn_{0.97}Al_{0.03}O$, $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ และ $Zn_{0.95}Al_{0.05}O$ จะพบว่ามีการฟส่วนน้อยเล็กๆแสดงอยู่ซึ่งเป็นกราฟของ $ZnAl_2O_4$ เรียกเฟสของกราฟเหล่านี้ว่า secondary phase หรือ spinel phase ซึ่งเกิดจากการเจืออลูมิเนียมเข้าไปมากเกินไป ผลของค่าคงที่โครงผลึกและปริมาตรหน่วยเซลล์แสดงดังตารางที่ 4.1

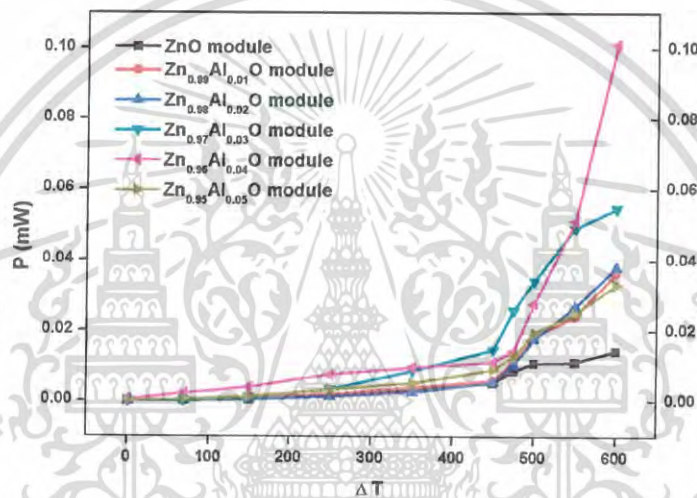
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและปริมาตรหน่วยเซลล์ของตัวอย่าง $Al-dope ZnO$

วิธีการเตรียมวัสดุตั้งต้น	วัสดุ	ค่าคงที่โครงผลึก a (Å)	ค่าคงที่โครงผลึก c (Å)	อัตราส่วนค่าคงที่โครงผลึก $\frac{c}{a}$	ปริมาตรหน่วยเซลล์ $\left(\text{Å}\right)^3$
ปฏิกิริยาของแข็ง	ZnO	3.251	5.206	1.602	47.651
ปฏิกิริยาของแข็ง	$Zn_{0.99}Al_{0.01}O$	3.250	5.206	1.602	47.651
ปฏิกิริยาของแข็ง	$Zn_{0.98}Al_{0.02}O$	3.250	5.205	1.602	47.651
ปฏิกิริยาของแข็ง	$Zn_{0.97}Al_{0.03}O$	3.249	5.205	1.602	47.651
ปฏิกิริยาของแข็ง	$Zn_{0.96}Al_{0.04}O$	3.249	5.205	1.602	47.651
ปฏิกิริยาของแข็ง	$Zn_{0.95}Al_{0.05}O$	3.249	5.204	1.602	47.651

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่โครงผลึกของการเจืออลูมิเนียมจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า อลูมิเนียมไอออน (0.39 Å) มีขนาดเล็กกว่าสังกะสีไอออน (0.60 Å) ทั้งนี้ทำให้สรุปได้ว่ามีอลูมิเนียมไอออนเข้าไปแทนที่สังกะสีไอออนภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์

4.2 กำลังไฟฟ้าขาออกเบื้องต้น

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของกำลังไฟฟ้าขาออกเบื้องต้นของวัสดุอลูมิเนียมเจือสังกะสีออกไซด์ เพื่อเป็นการคัดเลือกวัสดุที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกได้มากที่สุดไปประยุกต์เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นลำดับถัดไป ซึ่งจะทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ ในการแสดงผลจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิต่างกันระหว่างด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของตัวอย่าง

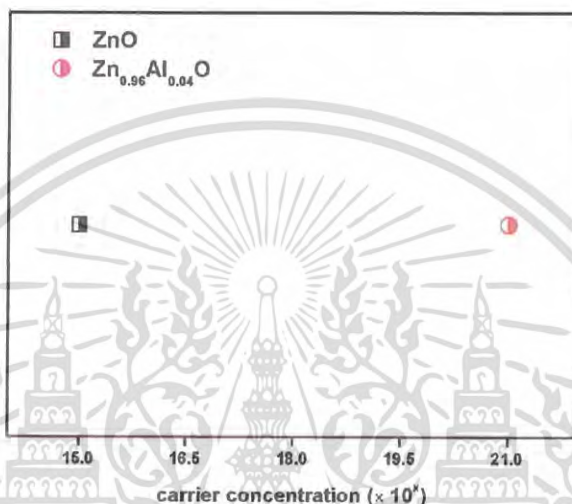
Al-dope ZnO

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าที่การเจืออลูมิเนียมอะตอมเข้าไปแทนที่สังกะสีอะตอมภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์ที่ปริมาณการเจือ 4 เปอร์เซ็นต์หรือ $x = 0.04$ หรือตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่าที่เปอร์เซ็นต์การเจืออื่น ซึ่งให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดประมาณ 0.1 มิลลิวัตต์ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและมีแนวโน้มที่ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อผลต่างอุณหภูมิต่างกันระหว่างผิวด้านร้อนและผิวด้านเย็นของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบแล้วว่าวัสดุตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ภายในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกและเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุที่การเจืออลูมิเนียม 4 เปอร์เซ็นต์สามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากที่สุด ในลำดับถัดไปของงานวิจัยนี้จะแสดงผลค่าความหนาแน่นของพาหะและผลทางคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ โดยจะแสดงผลโดยการเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความหนาแน่นของพาหะ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ(carrier concentration) โดยแสดงผลด้วยการเทียบระหว่างสังกะสีออกไซด์ก่อนการเจืออลูมิเนียมและสังกะสีออกไซด์ภายหลังการเจือด้วยอลูมิเนียม 4 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะ

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นแล้วว่าค่าความหนาแน่นของพาหะภายหลังการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทั้งนี้เป็นเพราะว่าอลูมิเนียมมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัวซึ่งมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอกสุดของสังกะสีซึ่งมีจำนวน 2 ตัว ดังนั้นการเข้าไปแทนที่ของอลูมิเนียมจึงทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ลำดับถัดไปจะเป็นการแสดงผลคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกที่ส่งวัดด้วยเครื่อง LZT meter

4.4 คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric properties)

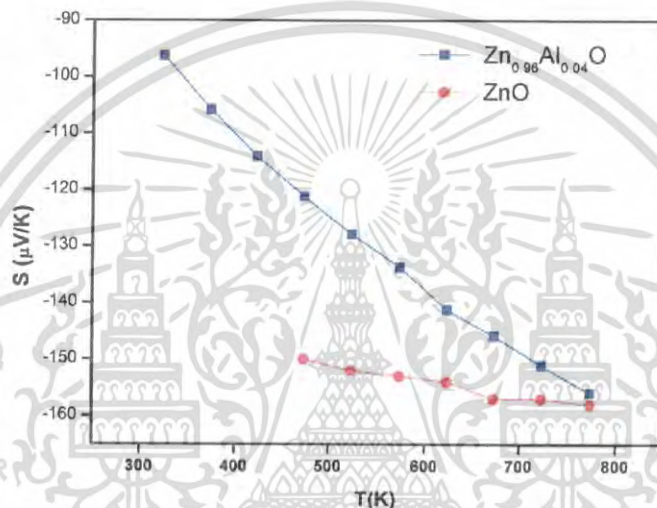
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการศึกษาคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LZT meter ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (seebeck coefficient) สภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและค่าสภาพการนำความร้อนจะเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นจะใช้ค่าทั้งสามนี้ในการคำนวณ power factor และ dimensionless figure of merit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัสดุตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ในการแสดงผลจะแสดงค่าโดยการเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของ ZnO จากงานวิจัยก่อนหน้า

4.4.1. สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิในช่วง 323 – 623 เคลวิน ของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้ที่เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ ZnO จากงานวิจัยก่อนหน้า



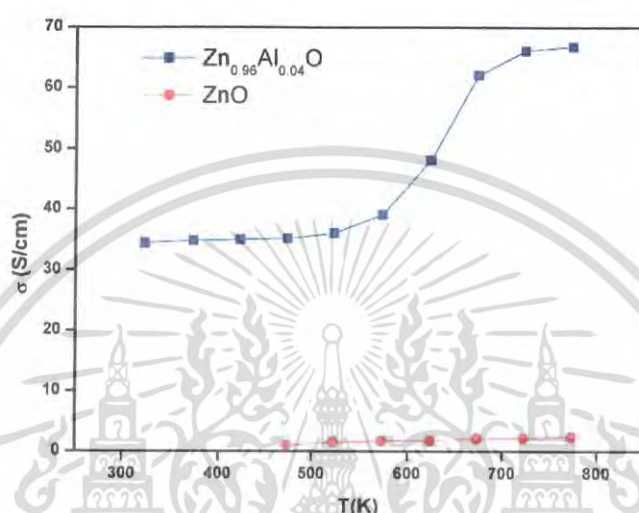
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ และ ZnO จากงานวิจัยก่อนหน้ามีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบทุกช่วงอุณหภูมิ นั่นคือตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) หรือสารกึ่งตัวนำที่มีพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนหรือประจุลบ และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของทั้งสองตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่สังเคราะห์ขึ้นภายในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสังกะสีออกไซด์ซึ่งทั้งนี้เป็นผลมาจากการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของพาหะดังนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคน้อยลงเมื่อทำการเจืออลูมิเนียมเข้าไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดคือ $-151.07 \frac{\mu V}{K}$ ที่อุณหภูมิ 623 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2. สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 323 – 773 เคลวินและแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพการนำไฟฟ้าของ ZnO แสดงผลดังรูปที่ 4.5



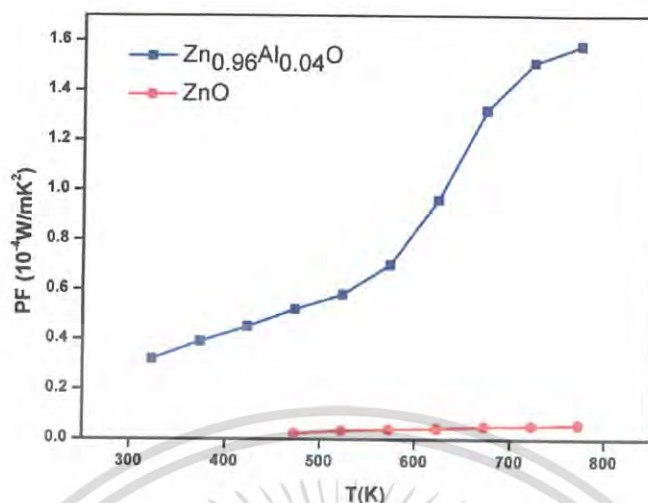
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของ ZnO จากงานวิจัยก่อนหน้าทุกช่วงอุณหภูมิ ทั้งนี้อาจอธิบายได้ด้วยสมการ $\sigma = nq\mu$ นั่นคือการแทนที่ Zn^{2+} ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสองตัวด้วย Al^{3+} ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัว ทำให้จำนวนของอิเล็กตรอนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นหรือค่าความหนาแน่นของพาหะ (n) มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพาหะก็จะส่งผลโดยตรงให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ $49.12 \frac{S}{cm}$ ที่อุณหภูมิ 773 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

4.4.3. แฟกเตอร์กำลังไฟฟ้า (Power factor)

ค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในค่าที่สำคัญสำหรับการพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้หรือทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ โดยค่าที่ได้จะมาจากการคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

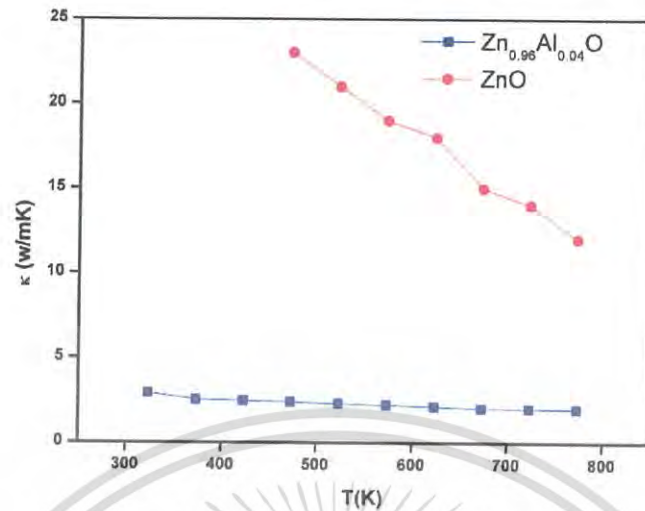


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าของ ZnO ประมาณ 17 เท่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าในแทนที่ที่ตำแหน่งสังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้นได้เป็นอย่างมาก และค่ากำลังไฟฟ้าของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ $1.51 \times 10^{-4} \frac{W}{mK^2}$ ที่อุณหภูมิ 773 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

4.4.4. สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

จากหัวข้อที่แล้วที่ได้แสดงผลของแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ในการพิจารณาคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นนอกจากจะพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วเราจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกหรือค่าสภาพการนำความร้อนด้วยเช่นกัน ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญมากอีกปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้นจำเป็นที่จะต้องมีความสภาพการนำความร้อนน้อยๆ ทั้งเพื่อเพื่อให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถรักษาผลต่างอุณหภูมิของปลายทั้งสองด้านได้ให้นานที่สุด ซึ่งการเจืออลูมิเนียมให้เข้าไปแทนที่สังกะสีในสังกะสีออกไซด์ของงานวิจัยนั้นนอกจากจะต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วก็ต้องการให้ปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเช่นกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะแสดงผลของค่าสภาพการนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 323 – 773 เคลวินและแสดงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำความร้อนของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าค่าสภาพการนำความร้อนของ ZnO ทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าในแทนที่ที่ตำแหน่งสังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้นได้เป็นอย่างมาก ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการบิดเบี้ยวของโครงผลึกทำให้ค่าการกระเจิงของโฟนอนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนมีค่าลดลง ค่าสภาพการนำความร้อนของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.01 วัตต์ต่อเมตรเคลวินที่อุณหภูมิ 773 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

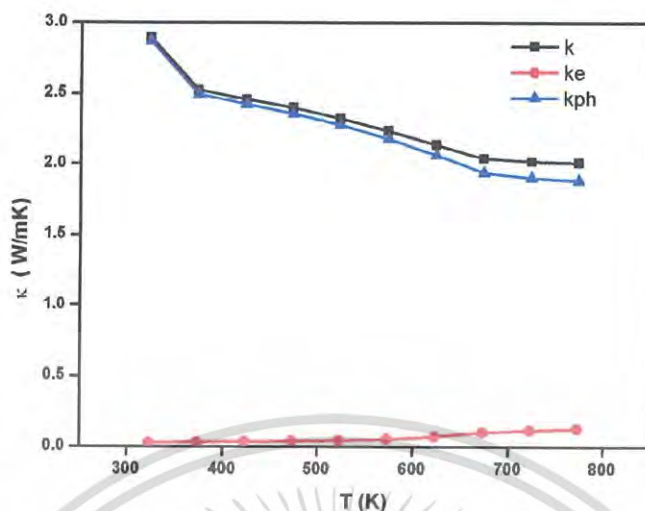
จากที่ทราบกันดีแล้วว่าค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็งประกอบด้วยสองส่วนคือ ค่าสภาพการนำความร้อนที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกหรือโฟนอน (κ_{ph}) และสภาพการนำความร้อนที่เกิดจากพาหะหรืออิเล็กตรอน (κ_e) ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 4.1

$$\kappa = \kappa_{ph} + \kappa_e \quad (4.1)$$

โดยที่

$$\kappa_e = L\sigma T \quad (4.2)$$

เมื่อ L คือ Lorenz number และเมื่ออาศัยสมการที่ (4.1) และ (4.2) ก็จะทำให้เราทราบได้ว่าค่าสภาพการนำความร้อนเกิดจากปัจจัยใดเป็นสาเหตุหลัก ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.8

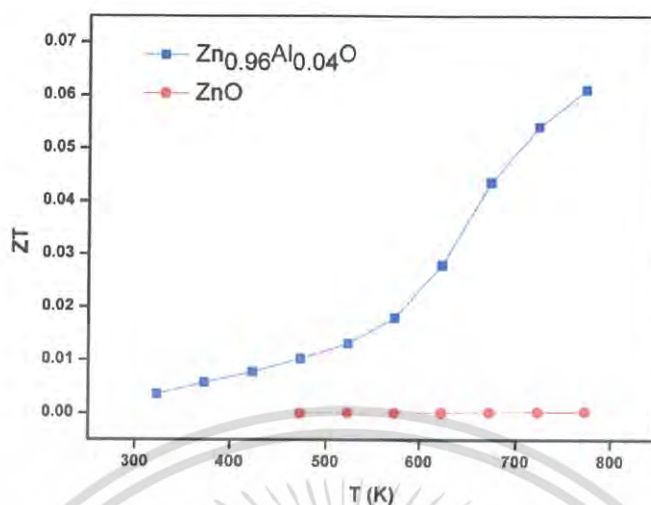


รูปที่ 4.8 แสดงค่าสภาพการนำความร้อน

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักของค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็งเกิดจากการสั่นของโครงผลึกหรือการสั่นของโฟนอนซึ่งค่าการนำความร้อนที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนโดยรวมมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั่นเอง ถึงแม้ว่ารูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำความร้อนที่เกิดจากพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ก็มีผลน้อยต่อสภาพการนำความร้อนโดยรวม

4.4.5. Dimensionless figure of merit (ZT)

จากที่ได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วค่า Dimensionless figure of merit มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนในรูปของสมการที่ 2.31 นั่นคือการที่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะมีประสิทธิภาพที่ดีหรือ Dimensionless figure of merit มีค่าสูงได้นั้นจำเป็นที่จะต้องมีความสัมพันธ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้าที่สูงและมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ และจากผลที่ได้รายงานไปในหัวข้อ 4.4.1 – 4.4.4 ทำให้ได้ผลของค่า Dimensionless figure of merit แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นการรายงานผลโดยการเปรียบเทียบค่า ZT ของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ กับตัวอย่าง ZnO



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ZT กับอุณหภูมิ

จากผลที่แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าค่า Dimensionless figure of merit ของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีค่าสูงกว่าค่า Dimensionless figure of merit ของตัวอย่าง ZnO ทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์วัสดุตั้งต้นด้วยวิธีการปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสังกะสีออกไซด์ให้ดีขึ้นได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ค่า Dimensionless figure of merit ของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.06 ที่อุณหภูมิ 773 เคลวินและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้นเป็นอย่างมาก ในลำดับถัดไปจะแสดงผลการพัฒนาการเชื่อมขั้วระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกและขั้วโลหะหรือขั้วอิเล็กทรอนิกส์

4.5 ผลของการพัฒนาการเชื่อมขั้ว

ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้แสดงถึงการวัสดุเลือกวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความเหมาะสมไปประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ได้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความสมบูรณ์หรือใกล้เคียงความสมบูรณ์มากที่สุดเราจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาการเชื่อมขั้วหรือพัฒนาการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วโลหะหรือขั้วอิเล็กทรอนิกส์ ในหัวข้อนี้จะแสดงการคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมขั้วโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ(contact resistant)

4.5.1 ผลการพิจารณาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ (R_c)

เพื่อนำกระแสไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุดปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือสายนำกระแสหรือในกรณีนี้คือการเชื่อมขั้วไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่ตัวผู้วิจัยสนใจจะนำมาใช้ในการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกคือโลหะอลูมิเนียม ทองแดง และทองแดงผสมเงิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยจะมีหลักการที่ใช้ในเลือกวัสดุเชื่อมขั้วที่เหมาะสมที่สุดสองประเด็นหลักคือเลือกวัสดุเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานและเมื่อนำไปเชื่อมแล้วจะให้ค่าความต้านทานรายน้อยที่สุด ลำดับถัดไปจึงเป็นการรายงานผลค่าความต้านทานรายน้อยต่อ (R_c) ระหว่างแท่งสารและวัสดุเชื่อมหรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ถ้าความต้านทานรายน้อยมีค่าสูงจะทำให้การนำไฟฟ้าของขั้วโลหะไม่ดีเพราะฉะนั้นจะต้องให้ความต้านทานรายน้อยมีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้การนำไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีประสิทธิภาพ โดยค่าความต้านทานรายน้อยได้มาจากการอาศัยวิธีการ Node method และมีขั้วโลหะสองชนิดคือแผ่นอลูมิเนียม แผ่นสแตนเลสสตีล 304 และแผ่นสแตนเลสสตีล 310s แสดงค่าความต้านทานรายน้อยได้แสดงค่าดังตารางที่ 4.2 โดยแสดงที่อุณหภูมิทดสอบ 350 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานรายน้อยของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่ 350 องศาเซลเซียส

ชนิดของขั้วโลหะ	ชนิดของวัสดุที่ใช้เชื่อม	ความต้านทานรายน้อย R_c (โอห์ม)
สแตนเลสสตีลเบอร์ 304	อากาศ	93.04
สแตนเลสสตีลเบอร์ 304	อลูมิเนียม	72.86
สแตนเลสสตีลเบอร์ 304	ทองแดง 100 %	41.35
สแตนเลสสตีลเบอร์ 304	ทองแดง 95 % + เงิน 5 %	34.01
สแตนเลสสตีลเบอร์ 310s	อากาศ	90.93
สแตนเลสสตีลเบอร์ 310s	อลูมิเนียม	65.92
สแตนเลสสตีลเบอร์ 310s	ทองแดง 100 %	33.28
สแตนเลสสตีลเบอร์ 310s	ทองแดง 95 % + เงิน 5 %	22.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

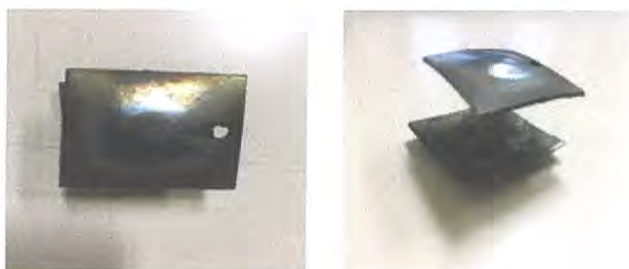
จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านรอยต่อที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสของตัวอย่างที่ใช้ขั้วโลหะเป็นแตนเลสสตีลเบอร์ 310s และใช้วัสดุทองแดงที่มีส่วนผสมของเงินในการเชื่อมขั้วมีค่าน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นทั้งนี้เป็นเพราะว่าขั้วโลหะสแตนเลสสตีลเบอร์ 310s มีคุณสมบัติที่มีความทนทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากกว่าสแตนเลสสตีลเบอร์ 304 จึงทำให้การใช้ขั้วโลหะสแตนเลสสตีลเบอร์ 310s ได้ค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อน้อยกว่าและสาเหตุที่ลวดเชื่อมทองแดงที่มีส่วนผสมให้ค่าความต้านทานรอยต่อน้อยกว่าลวดเชื่อมเป็นเพราะว่าเงินมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าโลหะชนิดอื่น ลำดับถัดไปจึงจะขอแสดงค่าความต้านทานรอยต่อของการใช้วัสดุทองแดงที่มีส่วนผสมของเงินมาใช้ในการเชื่อมขั้วที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อเป็นการพิจารณาว่าค่าความต้านทานรอยต่อนี้ยังคงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือไม่หรือเป็นรอยต่อที่ไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่นแล้ว ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานรอยต่อของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานรอยต่อ R_c (โอห์ม)
350	22.17
400	22.01
450	22.43
500	22.09

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปัจจัยภายนอกหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่มีผลต่อค่าความต้านทานรอยต่อหรือค่าความต้านทานรอยต่อมีค่าคงที่ จึงกล่าวได้ว่าวัสดุทองแดงที่มีส่วนผสมของเงินมีความเหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมขั้วและใช้ประโยชน์ที่อุณหภูมิสูงมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมขั้วเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูงคือวัสดุทองแดงที่มีส่วนผสมของเงิน (ทองแดง 100 % + เงิน 5 %)

จากผลทั้งหมดของหัวข้อนี้สรุปได้ว่าการใช้วัสดุทองแดงที่มีส่วนผสมของเงินเป็นวัสดุในการเชื่อมจะได้คุณสมบัติที่ความต้านทานรอยต่อมีค่าน้อยและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 แสดงไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก

4.6 การทดสอบไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก

จากหัวข้อก่อนหน้าทำให้ตัวผู้วิจัยสามารถเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมขั้วเพื่อให้ได้ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความใกล้เคียงความสมบูรณ์มากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการทดสอบไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกโดยจะแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 1. การทดสอบเชิงไฟฟ้าโดยจะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าขาออกกับอุณหภูมิ โดยจะทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 – 900 องศาเซลเซียส 2. การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของการเพิ่มจำนวนไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและอุณหภูมิ และ 3. การทดสอบความทนทานของไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้าและการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้รังสี แสดงผลดังต่อไปนี้

4.6.1 การทดสอบเชิงไฟฟ้า

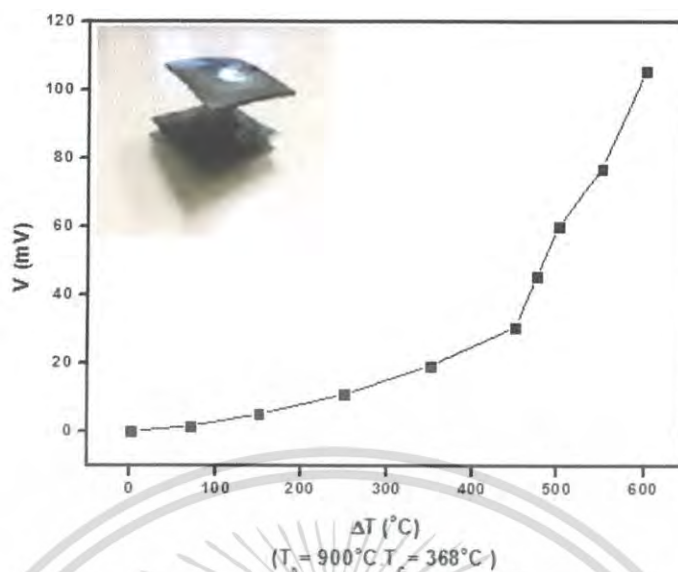
ในการทดสอบจะทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 – 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิฝั่งร้อนและอุณหภูมิฝั่งเย็นของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก

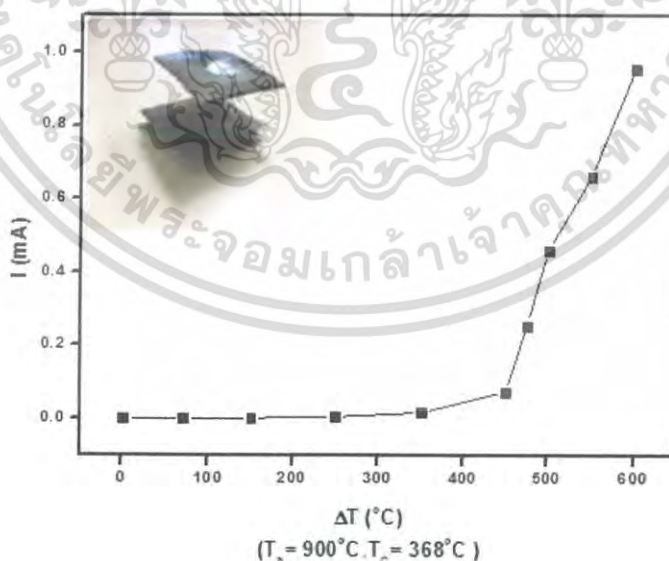
แสดงผลการทดสอบปริมาณทางไฟฟ้าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ

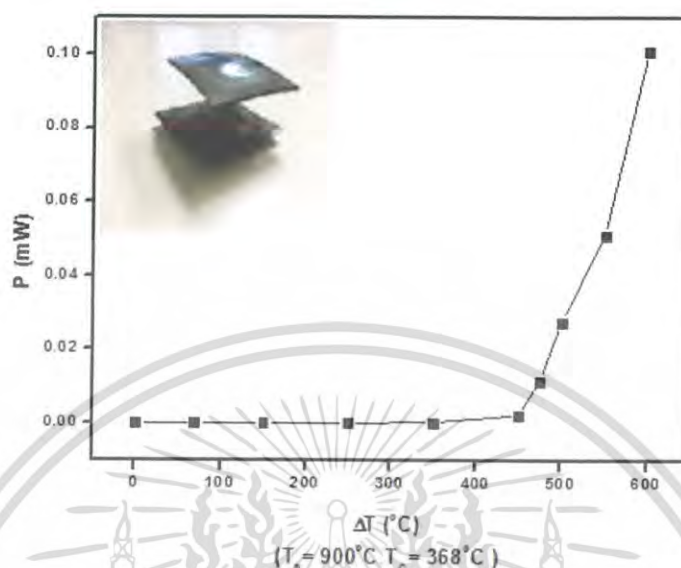
จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะประจุพาหะหรืออิเล็กตรอนที่ฝั่งร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีพลังงานจลน์สูงขึ้น และเคลื่อนที่ไปยังฝั่งที่อุณหภูมิต่ำกว่ามากขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 105 มิลลิโวลต์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (โดยที่ $T_h = 900^\circ\text{C}$ และ $T_c = 368^\circ\text{C}$)



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับผลต่างอุณหภูมิพบว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.9 มิลลิแอมแปร์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส (โดยที่ $T_h = 900^{\circ}\text{C}$ และ $T_c = 368^{\circ}\text{C}$) และยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

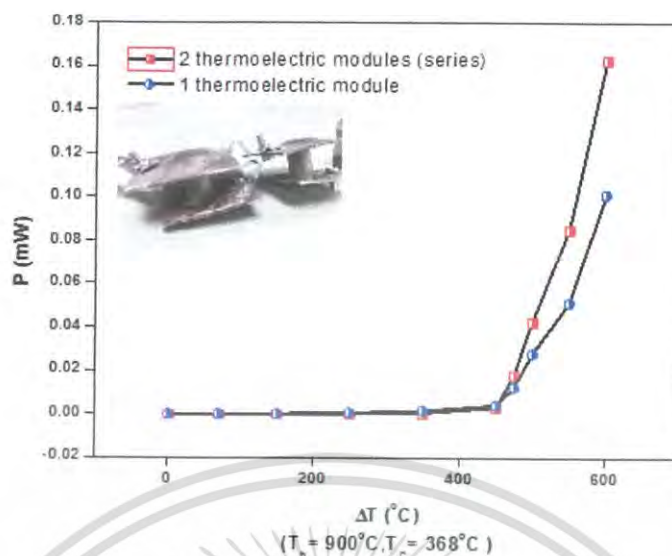


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและความแตกต่างของอุณหภูมิ

จากรูป 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.10 มิลลิวัตต์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (โดยที่ $T_h = 900^{\circ}\text{C}$ และ $T_c = 368^{\circ}\text{C}$) และยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

4.6.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของการเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนหนึ่งตัวและสองตัวโดยการนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมาต่ออนุกรมกันเพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลมากขึ้นแสดงผลดังรูปที่ 4.15 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของสองโมดูลมากกว่าหนึ่งโมดูลและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.16 มิลลิวัตต์ และ 0.10 มิลลิวัตต์ ที่ $\Delta T = 600$ ตามลำดับ นั่นคือการต่อหรือเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ามากขึ้น



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จำนวนหนึ่งตัวและสองโมดูล

จากผลทั้งหมดของการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่ได้แสดงไปข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ดีขึ้นเป็นอย่างมากและสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกได้เพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการนำมาต่ออนุกรมกันเปรียบได้เสมือนกับการต่อเซลล์ไฟฟ้า ในลำดับถัดมาจะขอนำเสนอการทดสอบความทนทานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ โดยจะแบ่งเป็นผลการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้าและผลการทดสอบเชิงกายภาพโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์

4.7 ผลการทดสอบความทนทานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$

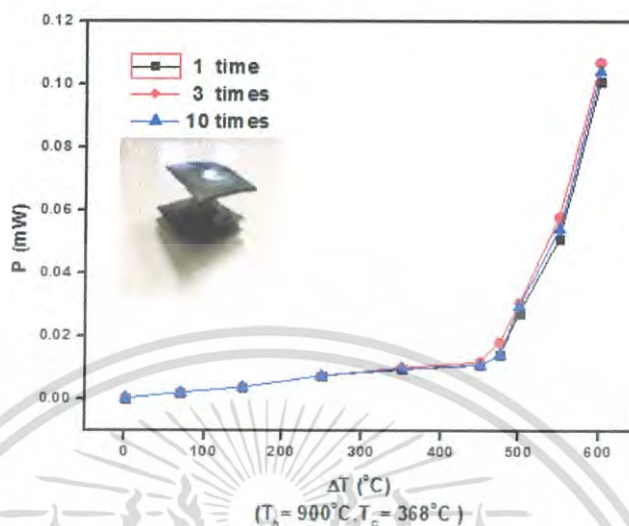
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงและความทนทานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้าและการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์

4.7.1 ผลการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่อุณหภูมิ 50 - 900 องศาเซลเซียสซึ่งจะเป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่าการใช้งานโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจำนวนมากขึ้นจะมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้หรือไม่โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

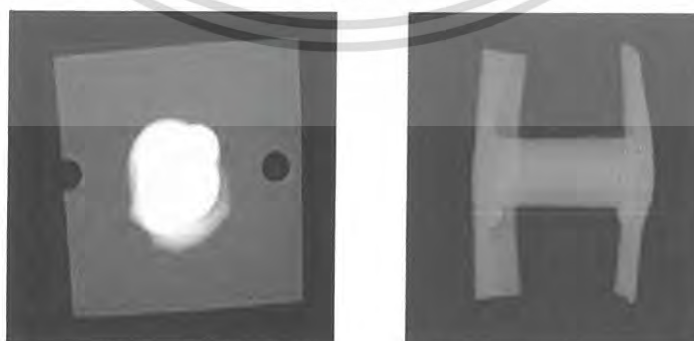
จะแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของการใช้งาน 1 ครั้ง, 3 ครั้งและ 10 ครั้ง แสดงผลดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออกของการใช้งานไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 1, 3 และ 10 ครั้ง

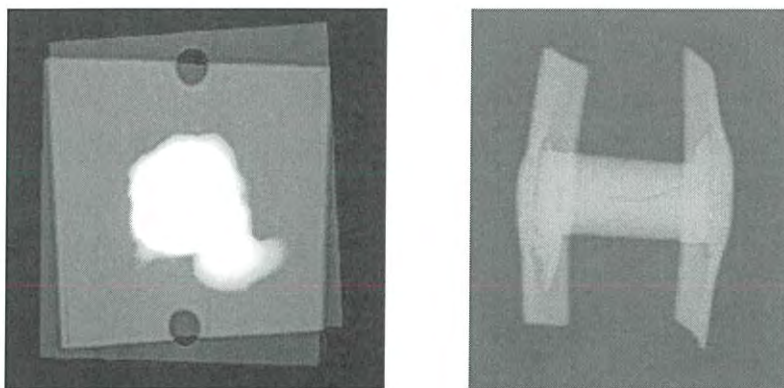
4.7.2 ผลการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์

การถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหารอยแตก ช่องว่างหรือข้อบกพร่องภายในวัสดุหรือชิ้นงานเพื่อเป็นการยืนยันความแข็งแรงก่อนการนำไปใช้งานจริง ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคนี้ในการยืนยันความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ กับขั้วโลหะหรืออิเล็กโทรดว่าการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสในจำนวนครั้งที่มากขึ้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกหรือบริเวณรอยเชื่อมหรือไม่ โดยจะแสดงผลการถ่ายของไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกก่อนการใช้งานและหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสจำนวน 3 และ 10 ครั้ง แสดงผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 แสดงภาพไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ก่อนการใช้งาน(ตัวที่ 1) โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงภาพไมครูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ก่อนการใช้งาน(ตัวที่ 2) โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.19 แสดงภาพไมครูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ หลังการใช้งาน 3 ครั้ง โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.20 แสดงภาพไมครูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ หลังการใช้งาน 10 ครั้ง โดยการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอ็กซ์

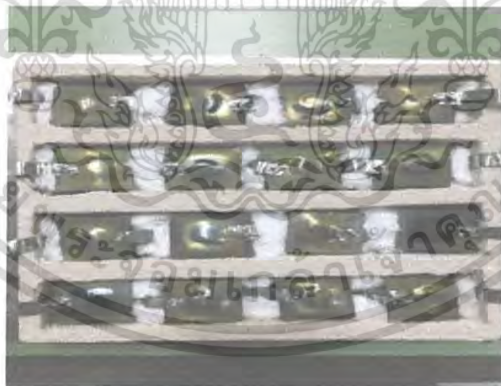
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์ที่แสดงดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นแล้วว่า รอยเชื่อมและแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ก่อนและหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสจะ ยังคงไม่มีรอยแตกหรือข้อบกพร่องที่บริเวณรอยเชื่อม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (โดยที่ $T_h = 900^{\circ}C$ และ $T_c = 368^{\circ}C$)

จากผลการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้าและผลการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นแล้วว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่ประกอบขึ้นภายในงานวิจัยนี้มีความแข็งแรง ทนทานและมีความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นในลำดับถัดไปจะขอเสนอผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก

4.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ประกอบด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จำนวน 16 ตัว โดยตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือห้องทำความร้อนโดยใช้แก๊สทุ้งต้มเป็นเชื้อเพลิง ตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) และระบบหล่อเย็นโดยใช้น้ำหมวนซึ่งเป็นระบบปิด และในการทดสอบจะทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 – 800 องศาเซลเซียส แสดงภาพการทดสอบดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงบล็อกโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทดสอบ

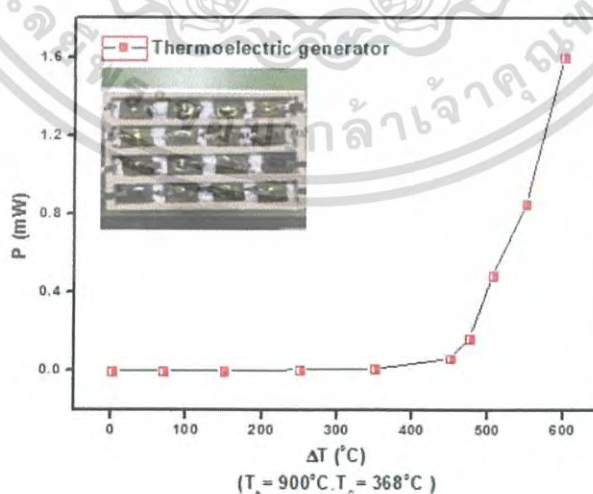


รูปที่ 4.22 แสดงการทดสอบเบื้องต้นของบล็อกโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 4.23 แสดงการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก

และแสดงผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.67 มิลลิวัตต์ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (โดยที่ $T_h = 800^{\circ}\text{C}$ และ $T_c = 227^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและผลต่างอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เทอร์โมอิเล็กทริก $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{O}$ ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ในขั้นต้นงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{1-x}Al_xO$ โดยที่ $x=0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีการปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้ง โดยทำการเผาแห้งที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงโดยใช้เตาไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน และมีผลการตรวจสอบดังนี้

คุณสมบัติเชิงผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีภายในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์สามารถทำได้เนื่องจากไม่พบกราฟบริสุทธิของอลูมิเนียมออกไซด์ และยังพบอีกว่าการเจืออลูมิเนียมเข้าไปไม่มีผลต่อการทำให้โครงสร้างของสังกะสีออกไซด์เปลี่ยนคือมีโครงสร้างแบบเดิมคือโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์แต่ในกรณีของการเจืออลูมิเนียมที่ 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์จะปรากฏกราฟแปลกล้อมซึ่งเป็นกราฟของ $ZnAl_2O_4$ ซึ่งเกิดจากการเจืออลูมิเนียมออกไซด์เป็นปริมาณมากเกินไปทำให้มีสังกะสีอะตอมบางตัวแพร่เข้ามาโดยเรียกกราฟของ $ZnAl_2O_4$ ว่า secondary phase หรือ spinel phase และจากการคำนวณค่าคงที่โครงผลึก a และ c พบว่ามีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณอลูมิเนียมทั้งนี้เป็นเพราะว่าอลูมิเนียมอะตอม (0.39 อังสตรอม) มีขนาดเล็กกว่าสังกะสีอะตอม (0.60 อังสตรอม)

คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของ $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้นและสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับสังกะสีออกไซด์แบบบริสุทธิ์ทั้งนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของพาหะเนื่องจาก Al^{3+} เป็นไดวาเลนซ์หรือมีอิเล็กตรอนวงนอกสามตัวและ Zn^{2+} เป็นไดวาเลนซ์หรือมีอิเล็กตรอนวงนอกสองตัวทำให้การเจืออลูมิเนียมเข้าไปมีผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นของพาหะและตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ มีค่า ZT สูงสุดเท่ากับ 0.06 ที่ 773 เคลวิน

ผลจากการพัฒนาการเชื่อมระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วโลหะหรืออิเล็กโทรด โดยอาศัยค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อพบว่าวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมขั้วเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสคือทองแดงที่มีส่วนผสมของเงิน 5 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและ

กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 105 มิลลิโวลต์, 0.911 มิลลิแอมป์ และ 10.5 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ การทดสอบการเชื่อมขั้วของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาเชื่อมขั้วเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสคือทองแดงที่มีส่วนผสมของเงิน 5 เปอร์เซ็นต์

มิลลิแอมแปร์และ 0.10 มิลลิวัตต์ตามลำดับและพบว่ามีความไวที่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิขึ้นหรือเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการนำมาต่ออนุกรมจากการทดสอบความทนทานของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยการวัดซ้ำเชิงไฟฟ้าและการทดสอบเชิงกายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พบว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ ที่ประกอบขึ้นจากงานวิจัยนี้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสได้ และจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.04}O$ จำนวน 16 ตัวพบว่ามีความสูงที่สุดเท่ากับ 1.67 มิลลิวัตต์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนาให้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำงานได้เต็มที่ได้กำลังไฟฟ้าออกมาเพิ่มขึ้น อาจทำได้โดยการทดสอบเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนขนาดของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกหรือเปลี่ยนขนาดของขั้วโลหะ



เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Mele, K. Matsumoto, T. Azuma, K. Kamesawa, S. Tanaka, J. Kurosaki and K. Miyazaki. 2009. "Development of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO/Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ module for thermoelectric power generation." Materials Research Society. 1166: 3-11.
- [2] D. M. Rowe and C. M. Bhandari. 1983. Modern Thermoelectrics. Eastbourne. Interprint limited.
- [3] H. Julian Goldsmid. 2014. "Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation." Materials. 7: 2577-2592.
- [4] K. Park, K.Y. Ko, W.-S. Seo, W.-S. Cho, J.-G. Kim and J.Y. Kim. 2007. "High-temperature thermoelectric properties of polycrystalline $\text{Zn}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ti}_y\text{O}$ ceramics." European Ceramic Society. 27: 813-817.
- [5] X. Qu, W. Wang, S. Lv and D. Jia. 2011. "Thermoelectric properties and electronic structure of Al-doped ZnO." Solid State Communications. 151: 332-336.
- [6] K.F. Cai, E. Müller, C. Drašar and A. Mrotzek. 2003. "Preparation and thermoelectric properties of Al-doped ZnO." ceramics Materials Science and Engineering. 104: 45-48.
- [7] M. Ohtaki, T. Tsubota and K. Eguchi. 1998. "Thermoelectric Properties of Oxide Solid Solutions Based on Al-doped ZnO." International Conference on Thermoelectric.
- [8] L. Zhang, T. Tosho, N. Okinaka and T. Akiyama. 2008. "Thermoelectric Properties of Solution Combustion Synthesized Al-Doped ZnO." Materials Transactions. 49: 2868-2874.
- [9] G. S. Nolas, J. Sharp and H. J. Goldsmid. 2001. Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Developments. New York. Springer.
- [10] ผศ. ดร. เจริญฐา รัตนพันธ์. 2017. เทอร์โมอิเล็กทริกส์. 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย
- [11] ทศวรรษ สีตะวัน. 2558. เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก Thermoelectric Technology. 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] I. B. Cadoff and E. Miller. 1960. *Thermoelectric Materials and Devices*. New York. Reinhold Publishing Corporation.
- [13] B. Lawson. "Direct Conversion of Heat Energy to Electrical Energy Thermocouple Electric Generators." [online].
<http://www.mpoweruk.com/thermoelectricity.htm>.
- [14] G. C. Jain and W. B. Berry. 1972. *Transport Properties of Solids and Solid State Energy Conversion*. New Delhi. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [15] A. Sakulkalaverk. 2010. "Thermoelectric Properties of Iron Silicide Synthesized by Thermal Method." Ph. D. Thesis of Chulalongkorn University.
- [16] อารีย์ เขียรฉาย. เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ. คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] เฉลิมพล รุจรดาวงค์, บุศรา นรารักษ์ และเบญจวรรณ ใจสว่าง. 2553. "การศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางของตัวนำออกไซด์โปร่งแสงบางชนิด" โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] C. Wood. 1998 "Materials for Thermoelectric Energy Conversion." *Reports on Progress in Physics*. 51: 459-539.
- [19] รศ. ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์. 2555. ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ *Physics of Semiconductors and Junctions*. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [20] H. Morkoç and Ü. Özgür. 2009. *Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology*. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [21] V. A. Coleman and C. Jagadish. 2006. *Basic Properties and Applications of ZnO. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures*. Elsevier Ltd.
- [22] M. Khuli, N. Fazouan, H. Makarim, G. E. Halani and E. H. Atmani. 2016. "Comparative first principles study of ZnO doped with group III elements." *Journal of Alloys and Compounds*. 688: 368-375.
- [23] T. Tsubota, M. Ohtaki, K. Eguchi and H. Arai. 1998. "Transport properties and thermoelectric performance of $(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_y)_x\text{Al}_x\text{O}$." *Journal of Materials Chemistry*. 8(2): 409-412.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] H. Cheng, X.J. Xu, H.H. Hng and J. Ma. 2009. "Characterization of Al-doped ZnO thermoelectric materials prepared by RF plasma powder processing and hot press sintering." *Ceramics International*. 35: 3067-3072.
- [25] J.P. Wiff, Y. Kinemuchi, H. Kaga, C. Ito and K. Watari. 2008. "Correlations between thermoelectric properties and effective mass caused by lattice distortion in Al-doped ZnO ceramics." *Journal of the European Ceramic Society*. 29: 1413-1418.
- [26] S. Jantrasee, P. Moontragoon and S. Pinitsoontorn. 2016. "Thermoelectric properties of Al-doped ZnO: experiment and simulation." *Journal of Semiconductors*. 37(9).
- [27] ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. กรุงเทพฯ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [28] นักศึกษาฝึกงาน กลุ่มงานวิจัยและพัฒนาชีวเคลียร์. 2011. แบบจำลองกล่องลูกบาศก์โดยการใช้โปรแกรม MCNP. [online].
<https://nuc2011.wordpress.com/category/learn/page/2/>.
- [29] ทรงพล รอดทอง, รุ่งสรรค์ เมืองเหลือ, โสภณ พรหมชัย และ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. 2547. กระบวนการโลหะของรอยสัมผัสโหนดมีคสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทย. 21: 49-55.
- [30] Chaniotakis and Cory. 2006. *Circuit Analysis using the Node and Mesh Methods*. Spring.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคขนาดเล็กจากวัสดุ $Zn_{1-x-y}Al_xMn_yO$
 สำหรับปั่นไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดความร้อนสูง
 Development Thermoelectric Properties of Al-doped ZnO Materials
 for Thermoelectric Generator

ศฤงคาร จันทรประทีป¹ และ เชษฐา รัตนพันธ์^{*1}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ผู้ติดต่อ : chesta.ruttanapun@gmail.com, chesta.ru@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ZnO และ $Zn_{1-x-y}Al_xMn_yO$ ($0.01 \leq x \leq 0.03$, $0.01 \leq y \leq 0.03$ และ $x + y = 0.04$) ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้ง วัสดุตั้งต้นประกอบด้วยผง ZnO, Al_2O_3 และ MnO_2 เมาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเผาแข็งที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศปกติ โครงสร้างทางผลึกวิทยาถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์(XRD) จากการตรวจสอบพบว่าการเจือ Al และ Mn เข้าไปแทนที่ Zn ภายในโครงสร้างของ ZnO จะไม่ทำให้โครงสร้างของ ZnO เปลี่ยนแปลง สัมประสิทธิ์ซีเบคซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกตรวจสอบด้วยเครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูงสุดและมีค่าเท่ากับ 212 $\mu V/K$ ที่อุณหภูมิ 623 K ตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ ถูกนำไปใช้ประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก จากการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าหนึ่งโมดูลจะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.05 mW ที่ $\Delta T = 500$ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิหรือเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการนำมาต่อกันและจากการนำโมดูล $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ จำนวนสิบโมดูลมาประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคขนาดเล็กพบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.32 mW ที่ $\Delta T = 500$ องศาเซลเซียส

คำหลัก: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบค, เทอร์โมอิเล็กทริก, โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและสังกะสีอุณหภูมิสูง

Abstract

Thermoelectric materials ZnO and $Zn_{1-x-y}Al_xMn_yO$ ($0.01 \leq x \leq 0.03$, $0.01 \leq y \leq 0.03$ and $x + y = 0.04$) was synthesized by drying classical solid state reaction starting from the oxide powders of ZnO, Al_2O_3 and MnO_2 . The samples were sintered in furnace at 1,200 °C for 22 hours. in air atmosphere. Their crystal structure and morphology were characterized by using X ray diffraction (XRD). The results showed that doping Al and Mn into the ZnO didn't have affect to the structure of ZnO. The seebeck coefficient was measured by home made in a laboratory. The best doped sample was $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ showing seebeck coefficient $S = 212 \mu V/K$ at 623 K. The $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ thermoelectric module was tested at the high temperature by electrical furnace. The maximum value of electrical power was 0.05 mW at 900 °C in $\Delta T = 600$. The electrical power tended to increase by increasing temperature difference and electrically connecting thermoelectric modules into series. The ten $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ modules for thermoelectric generator can generate electric power 0.32 mW at $\Delta T = 600$ °C. Thus, the $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ thermoelectric material can be used for application of thermoelectric generator at high temperature.

Keywords: Al and Mn co doped ZnO, Thermoelectric, Thermoelectric generator and Thermoelectric module

ENETT13-ME-70

801

บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้หลักการตามปรากฏการณ์ซีเบค ซึ่งก็คือปรากฏการณ์ที่สามารถผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง ซึ่งเกิดขึ้นได้ในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนมากโดยอยู่ในรูปของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยค่าประสิทธิภาพการผันพลังงานจากความร้อนเป็นไฟฟ้าขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถของความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งค่าซีเบคเป็นคุณสมบัติวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือ ค่า Dimensionless Figure of Merit แทนด้วยสัญลักษณ์

$$ZT \text{ เป็นค่าที่คำนวณได้ตามสูตร } ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T \text{ โดยที่}$$

S , σ , κ และ T คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพนำไฟฟ้า, สภาพนำความร้อนและอุณหภูมิสัมบูรณ์ตามลำดับ สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีคือสามารถผันพลังงานไฟฟ้าได้สูงจากพลังงานความร้อน คือต้องมีค่าสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีค่าสูงมาก แต่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ ปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนมากคือ Bi_2Te_3 [1] และ ZnO โดยที่ Bi_2Te_3 จะถูกนำไปใช้งานในตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิห้องและต่ำกว่าเพราะสามารถผันไฟฟ้าได้ดีในช่วงนี้ และ Bi_2Te_3 มีจุดหลอมเหลวที่ไม่เกิด 300°C ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้งาน ที่อุณหภูมิสูงได้ ส่วน ZnO นั้นสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงได้ เพราะมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก (1800°C) [2] เอลิเยร์ที่อุณหภูมิสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น Bi_2Te_3 มีช่วงทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ส่วน ZnO สามารถใช้ที่เกินกว่า 500°C ได้

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ดังนั้นจึงเลือกวัสดุ ZnO มาเป็นวัสดุสำหรับประยุกต์เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แต่สำหรับ ZnO จะแสดงค่า ZT ที่ต่ำทำให้มีงานวิจัยมากมายที่ทำการการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของ ZnO โดยการเจือ Al เข้าไปแทนที่ Zn ภายในโครงสร้างของ ZnO เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ผลปรากฏว่าการเจือ Al จะช่วยปรับปรุงเพียงค่าสภาพนำไฟฟ้าและสภาพค่าความร้อนไปในทิศทางที่ดีขึ้น

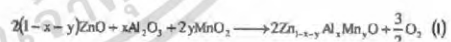
เท่านั้นแต่จะลดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค [3-5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเจือ Al ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำให้เพิ่มค่าสภาพนำไฟฟ้าและลดค่าสภาพนำความร้อนและเจือ Mn ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค [6-7] เข้าไปแทนที่ Zn ภายในโครงสร้างของ ZnO ($\text{Zn}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{O}$) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทั้งสามทางเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้น ในการเตรียมวัสดุตั้งต้นจะเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง [8] แบบแห้งเพราะเป็นวิธีที่สามารถเตรียมได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและสามารถเตรียมสารตั้งต้นได้ในปริมาณมาก การนำกระแสไฟฟ้าออกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้นั้นจำเป็นต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าหรือเชื่อมระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดเข้ากับแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยการเชื่อมขั้วไฟฟ้าที่ดีคือขั้วต้องไม่มีผลกระทบต่อการนำไฟฟ้าหรือเป็นรอยต่อแบบโอห์มิก [9]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ($\text{Zn}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{O}$) สำหรับการประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และนำมาพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบค และได้ทำการศึกษาเพื่อหาวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมขั้วและสามารถประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยจะพิจารณาจากค่าความต้านทานรอยต่อและค่าทางคักภายในรอยต่อของรอยเชื่อม และทำการวัดค่าการผันไฟฟ้าจากความร้อนดังกล่าว

การทดลอง

การเตรียมสารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสารตัวอย่าง ZnO และ $\text{Zn}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{O}$ ($0.01 \leq x \leq 0.03$, $0.01 \leq y \leq 0.03$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้งตามปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ 1



โดยที่ $0.01 \leq x \leq 0.03$, $0.01 \leq y \leq 0.03$ และ $x + y = 0.04$

สำหรับการเตรียมสารตัวอย่างได้ใช้วัสดุตั้งต้นเป็นแบบผง ประกอบด้วย ZnO ($\geq 99\%$, Ajax Finechem), Al_2O_3 ($\geq 98\%$, Sigma Aldrich) และ

MnO_2 ($> 99\%$, Himedia) โดยนำสารตั้งต้นทั้งสามชนิดมาทำการชั่งตามสัดส่วนน้ำหนัก แล้วนำมาผสม บดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันในครก A grade เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำไปเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำผงที่ได้จากการเผาแคลไซต์ไปอัดเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 5 เมกกะพาสคาล แล้วจึงนำแท่งสารที่ได้ไปเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง

การยืนยันลักษณะเฉพาะ

เพื่อยืนยันสารตัวอย่าง ZnO และ $Zn_{1-x-y}Al_xMn_yO$ ที่เตรียมได้ว่ามีโครงสร้างทางผลึกวิทยาตามที่ต้องการ จึงทำการตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกวิทยาของตัวอย่าง ZnO , $Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O$, $Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O$ และ $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Bruker, D8 Advance with X ray source : XRD) ที่มุมเริ่มต้นตั้งแต่มุม 10-80 องศา โดยให้เพิ่มมุมครั้งละ 0.02 องศาต่อวินาที

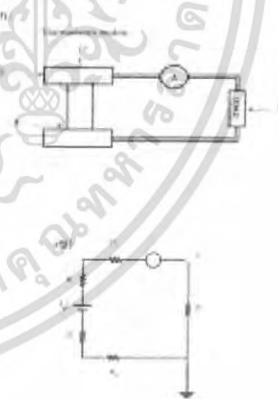
และได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกการผันพลังงานจากความร้อนเป็นไฟฟ้าของวัสดุในสารตัวอย่าง ZnO และ $Zn_{1-x-y}Al_xMn_yO$ ที่เตรียมได้หลังจากยืนยันโครงสร้างผลึกที่ถูกต้องด้วย XRD แล้ว ด้วยเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ที่ทำการประกอบขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเทอร์โมอิเล็กทริกส์ภาควิชาชีพิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคประกอบด้วยตัวห้องทำความร้อนโดยแหล่งกำเนิดความร้อนคือเตาให้ความร้อน hot plate เทอร์โมคอปเปิลจำนวนสามตัวสำหรับวัดอุณหภูมิห้องทำความร้อน วัดอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของวัสดุ และเก็บข้อมูลด้วยมัลติมิเตอร์ โดยจะทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในช่วงอุณหภูมิ 323 - 623 เคลวิน

การประดิษฐ์ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก

จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในสารตัวอย่าง ZnO , $Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O$, $Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O$ และ $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ สำหรับ สารตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคดีกว่าสารตัวอย่างอื่นจะถูกเลือกมาทำการประยุกต์ประดิษฐ์เป็น

ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก โดยเลือกจากสารตัวอย่างที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูงที่สุด

การประดิษฐ์ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มต้นจากการนำผงสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาแคลไซต์มาทำการอัดเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผาผลึกขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ได้เป็นแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นนำแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ถูกเผาขึ้นรูปแล้วมาทำการเชื่อมต่อกับแผ่นขั้วโลหะนำไฟฟ้า โดยใช้แผ่นสแตนเลสตีลบางเป็นโลหะขั้วโลหะนำไฟฟ้า เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงเหมาะสมกับการนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง และใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมด้วยทองแดงและเงิน เป็บตัวเชื่อมประสานระหว่างแท่งเทอร์โมอิเล็กทริกกับแผ่นขั้วไฟฟ้าสแตนเลส โดยทำการประดิษฐ์เสร็จจะได้เป็นแท่งไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 (ก) ในการประดิษฐ์แท่งไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก จะมีการตรวจสอบค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ (R_c) และกำหนดศักย์ไฟฟ้า (V_{bi}) ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง แท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับแผ่นขั้วไฟฟ้าสแตนเลส โดยการต่อวงจรทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 แสดง (ก) แผนภาพและ (ข) วงจรการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ

ENETT13-ME-70

สำหรับการหาค่าความต้านทานที่บริเวณรอยระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกกับแผ่นขั้วไฟฟ้าสแตนเลส ใช้หลักการ node method[10] ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 2

$$R_c = -\left[\frac{V}{I} + R_E + R_L\right] \quad (2)$$

โดยที่ R_c , V , I , R_E และ R_L คือความต้านทานที่บริเวณรอยต่อ (Ω), ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (A), ความต้านทานของแผ่นขั้วไฟฟ้าและความต้านทานของโหลด (Ω) ตามลำดับ และทำการศึกษาค่าค่าแรงศักย์ไฟฟ้า[11]ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่ใช้เชื่อม(โลหะ)และแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก(สารกึ่งตัวนำ)ใช้การวิเคราะห์ด้วยสมการที่ 3

$$V_m = \phi_m - \chi - \frac{T}{q} \left[\frac{E_g}{2} - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \right] \quad (3)$$

เมื่อ V_m , ϕ_m , χ , q , E_g , k , T , N_D และ n_i คือ ก้าวแรงศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ, ฟังก์ชันงานของโลหะ, สมรรถภาพอิเล็กตรอน, ประจุอิเล็กตรอน, ช่องว่างแถบพลังงาน, ค่าคงที่ของโบลต์มันน์, อุณหภูมิ (K), อะตอมสามเงาผู้ให้และความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำตามลำดับ

การทดสอบการผันไฟฟ้าจากความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับการทดสอบการผันไฟฟ้าจากความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 30 - 900 องศาเซลเซียส โดยให้แหล่งกำเนิดความร้อนจากเตาไฟฟ้า โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ

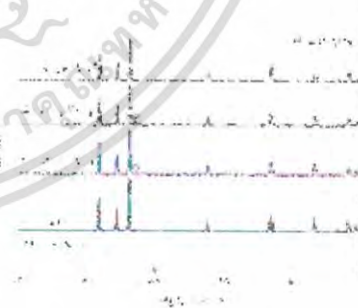
- 1) ทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ เพื่อศึกษาค่าความสัมพัทธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ
- 2) ทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ZnO และ $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองว่าการเจือ

อลูมิเนียมและแมงกานีสมีผลมากน้อยอย่างไรกับการผลิตไฟฟ้า

3) ทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ โดยการเพิ่มจำนวนโมดูลโดยการต่ออนุกรมเพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าขาออกว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อการเพิ่มจำนวนโมดูลและขยายผลต่อ โดยการนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ ไปเป็นส่วนประกอบของเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและทำการทดสอบเก็บข้อมูล ซึ่งการเก็บข้อมูลจะใช้มัลติมิเตอร์ (Agilent 34461A Digit Multi - meter)

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการตรวจวัดสารตัวอย่าง ZnO และ $Al - Mn$ co - doped ZnO ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงผลโดยการเปรียบเทียบที่มาตรฐานของ ZnO (PDF#890511) จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง ZnO และตัวอย่างที่มีการเจือ Al, Mn ใน ZnO ยังคงแสดงผลตรงกับที่มาตรฐานแต่ในกรณีของตัวอย่าง $Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O$ และ $Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O$ จะแสดงพีคส่วนน้อยปรากฏซึ่งเป็นพีคของ $ZnAl_2O_4$ โดยพีคนี้เกิดขึ้นจากการที่เจืออลูมิเนียมมากเกินไปซึ่งเรียกพีคเหล่านี้ว่าพีคของเฟสสปินเนล (spinel phase) หรือเฟสที่สอง (secondary phase) ซึ่ง $ZnAl_2O_4$ มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 2 แสดงกราฟ XRD ของตัวอย่าง ZnO , $Al - Mn$ co - doped ZnO และพีค ZnO มาตรฐาน

ENETT13-ME-70

ค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) และปริมาตรของหน่วยเซลล์ (V) แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (4)$$

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c \quad (5)$$

ค่าคงที่ของโครงผลึกของตัวอย่าง ZnO คือ $a = 3.251 \text{ \AA}$ และ $c = 5.206 \text{ \AA}$ ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับวรรณกรรม [12] แต่ในกรณีของค่าคงที่ของโครงผลึกของตัวอย่าง Al-Mn co-doped ZnO ทั้งสามตัวอย่างจะมีค่าที่แตกต่างกันแต่จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ของโครงผลึกของตัวอย่าง ZnO ทั้งนี้มีผลมาจากปริมาณการเจืออลูมิเนียมและแมงกานีสเข้าไปแทนที่สังกะสีในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์ซึ่งอลูมิเนียมไอออนและแมงกานีสไอออนมีขนาดที่เล็กกว่าสังกะสีไอออนแต่สัดส่วนค่าคงที่ของโครงผลึกของทุกตัวอย่างมีค่าเท่ากันคือ 1.602

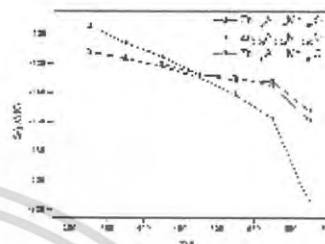
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางผลึกของตัวอย่าง ZnO และ Al-Mn co-doped ZnO

ตัวอย่าง	ค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) (Å)	ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (V) (Å ³)
ZnO	3.251, 5.206	1.602
Zn _{0.96} Al _{0.03} Mn _{0.01} O	3.251, 5.206	1.602
Zn _{0.96} Al _{0.02} Mn _{0.02} O	3.251, 5.206	1.602
Zn _{0.96} Al _{0.01} Mn _{0.03} O	3.251, 5.206	1.602

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า การเตรียมตัวอย่าง Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O, Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O และ Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้งในงานนี้จะยังให้โครงสร้างของตัวอย่างทั้งสามเป็นแบบเดียวกับโครงสร้างของ ZnO หรือโครงสร้างแบบ wurtzite structure หรือกล่าวได้ว่าการเจือ Al และ Mn ไม่มีผลทำให้โครงสร้างของ ZnO เปลี่ยนแปลง

ในลำดับถัดไปจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคซึ่งเป็นค่าที่ใช้พิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคของตัวอย่าง Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O,

Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O และ Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O กับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O, Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O และ Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นค่าลบ นั่นคือทั้งสามตัวอย่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n type) คือมีพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนหรือประจุลบและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเจือ Mn เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่าความไม่สมดุลกันของสปินขึ้นและสปินลงของอิเล็กตรอนภายใน d-orbital ของ Mn ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเพิ่มขึ้น [6] จากผลแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของตัวอย่าง Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O มีค่ามากที่สุดและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 212 $\mu\text{V/K}$ ที่อุณหภูมิ 623 K

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกตัวอย่าง Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O เพื่อไปประดิษฐ์เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากความร้อน ซึ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาประยุกต์ใช้งานได้ และเพื่อการนำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาใช้ให้ได้มากที่สุดปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือสายนำกระแสหรือในกรณีนี้คือการเชื่อมต่อขั้วโลหะไฟฟ้าโดยใช้หลักการเลือกวัสดุเชื่อมขั้วอยู่ 2 ประเด็นหลักๆ คือ 1) เลือกวัสดุเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำงานและ 2) เมื่อนำไปเชื่อมแล้วจะให้ความต้านทานรอยต่อที่น้อยที่สุด ในลำดับถัดไปจึงเป็นการรายงานผลค่าความต้านทานรอยต่อ (R_c) ระหว่างแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกและวัสดุเชื่อมหรือรอยต่อระหว่างขั้วโลหะและ

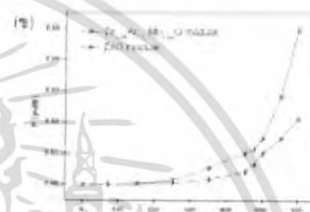
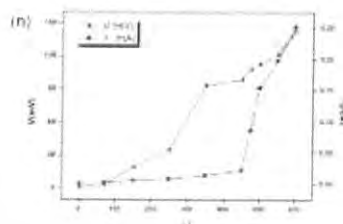
สารกึ่งตัวนำ ดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม
 ขั้วโลหะคือลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมระหว่างเงินและทองแดง
 จากนั้นใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Node method เพื่อหาค่า
 ความต้านทานรอยต่อ โดยได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต้านทานรอยต่อ

วัสดุที่ใช้เชื่อม	ความต้านทานรอยต่อ $R_c (\Omega)$	ฟังก์ชันงาน (V)
เงิน	22.77	4.26
ทองแดง	33.28	4.67

จากตารางที่ 2 เป็นการแสดงค่าความต้าน
 รอยต่อ โดยจากค่าในตารางจะเห็นว่าค่าความต้าน
 รอยต่อ ที่ใช้วัสดุเงินมีค่าน้อยกว่าวัสดุทองแดง จึงกล่าวได้
 วัสดุเงินมีความเหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมขั้วและใช้
 ประโยชน์ที่อุณหภูมิสูงมากกว่าวัสดุทองแดง ซึ่งให้ผลที่
 สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่ากำลังที่ตกภายในรอยต่อ
 จากสมการที่ 3 นั่นคือค่ากำลังตกจะมีค่าน้อยหรือแคบ
 ที่สุดเมื่อฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยที่สุดและจาก
 ตารางที่ 2 ก็แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันงานของเงินมีค่าต่ำกว่า
 ทองแดง[13] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความเหมาะสมใน
 การนำมาเชื่อมขั้วเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูง
 คือเงิน

เมื่อทราบโลหะที่เหมาะสมสำหรับการนำมา
 เชื่อมขั้วโลหะแล้วในลำดับถัดไปจะเป็นการประดิษฐ์โมดูล
 เทอร์โมอิเล็กทริกและทดสอบการผันไฟฟ้าจากความร้อน
 ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับระบบที่ใช้ทดสอบ
 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นประกอบด้วยเทอร์โมคอปเปิล
 สองตัวสำหรับวัดอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็นด้านละหนึ่ง
 ตัวและใช้เตาไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยการ
 ทดสอบจะทดสอบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 - 900
 $^{\circ}\text{C}$ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ, ความต่าง
 ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
 $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ แสดงดังรูปที่ 4 (ก) จากรูป
 สามารถกล่าวได้ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและ
 กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมี
 ค่าสูงสุดที่ได้ในการวัดครั้งนี้คือเท่ากับ 143 mV และ
 0.25 mA ที่ $\Delta T = 600$ ตามลำดับ ค่าดังกล่าวนี้เป็นการ
 จำกััดความร้อนที่ 900 $^{\circ}\text{C}$



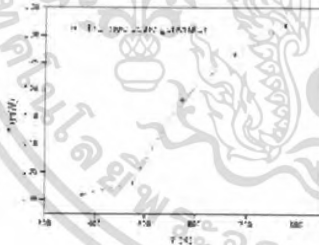
รูปที่ 4 แสดง (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง V , I และ T
 ของโมดูล $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ (ข) กำลังไฟฟ้าขาออก
 ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ZnO และ
 $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ (ค) กำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล
 เทอร์โมอิเล็กทริก $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ จำนวนหนึ่ง
 ตัวและสองตัว

รูปที่ 4 (ข) แสดงค่าการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า
 ขาออก (P) ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ZnO และ
 $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่า
 กำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{O}$ สูง
 กว่าโมดูล ZnO ทุกช่วงอุณหภูมิ รูปที่ 4 (ค) แสดงค่าการ

เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ จำนวนหนึ่งตัวและสองตัว ด้วยวิธีการต่อด้วยอนุกรมทางไฟฟ้า เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลมากขึ้น จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของสองโมดูลมากกว่าหนึ่งโมดูลและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.075 mW และ 0.05 mW ที่ $\Delta T = 600$ องศาตามลำดับ นั่นคือการต่อหรือเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ามากขึ้น

จากผลทั้งหมดของการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้แสดงไปข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าการเจืออลูมิเนียมและแมงกานีสเข้าไปแทนที่สังกะสีในโครงสร้างของสังกะสีออกไซด์สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ดีขึ้นเป็นอย่างมากและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิและเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการนำมาต่ออนุกรม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ จำนวน 10 โมดูลมาทำการต่อด้วยวิธีอนุกรมทางไฟฟ้า เพื่อประดิษฐ์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคขนาดเล็ก แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับผลต่างอุณหภูมิดังรูปที่ 5 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.32 mW ที่ $\Delta T = 500$



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ ขนาดเล็ก

สรุปผลการทดลอง

การเตรียมตัวอย่าง ZnO , $Zn_{0.96}Al_{0.03}Mn_{0.01}O$, $Zn_{0.96}Al_{0.02}Mn_{0.02}O$ และ $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาของแข็งแบบแห้ง ตรวจสอบโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากการศึกษาพบว่า การเจือ Mn และ Al เข้าไปแทนที่ Zn ภายในโครงสร้างของ ZnO จะไม่ทำให้โครงสร้างของ ZnO มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีโครงสร้างแบบเดิมคือ wurtzite structure การพิจารณาเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมขั้วเพื่อนำกระแสไฟฟ้าออกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงที่พิจารณาจากความต้านทานรอยต่อและการวิคราะห์ที่กำแพงขั้วภายในรอยต่อ พบว่าเงินเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดและจากการทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงพบว่ามีความกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 mW ต่อหนึ่งโมดูล และ $\Delta T = 500$ และจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคที่ประกอบด้วยโมดูลจำนวน 10 โมดูลพบว่าได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.32 mW ที่ $\Delta T = 500$ จากการศึกษาทดลองเพิ่มเติมพบว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มผลต่างอุณหภูมิและเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยวิธีการต่อแบบอนุกรม เมื่อทราบถึงความเหมาะสมของแต่ละเงื่อนไขในการนำวัสดุ $Zn_{0.96}Al_{0.01}Mn_{0.03}O$ มาประกอบเป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดนี้ ทำให้ในอนาคตหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซีเบคก็จะง่ายต่อการคำนวณจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้จากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยสำหรับค่าใช้จ่ายสนับสนุนต่างๆ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับสถานที่การวิจัย จึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อ้างอิง

- [1] H. Julian Goldsmid (2014). Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation, *Materials*, Vol. 7, March 2014, pp. 2577-2592.
- [2] K. Park, K.Y. Ko, W.-S. Seo, W.-S. Cho, J.-G. Kim and J.Y. Kim (2007). High temperature thermoelectric properties of polycrystalline $Zn_{1-x}yAl_xTi_yO$ ceramics, *European Ceramic Society*, Vol. 27, May 2006, pp. 813-817.
- [3] Xiurong Qu, Wen Wang, Shuchen Lv and Dechang Jia (2011). Thermoelectric properties and electronic structure of Al doped ZnO, *Solid State Communications*, vol. 151, November 2010, pp. 332-336.
- [4] K.F. Cai, E. Müller, C. Drašar and A. Mrotzek (2003). Preparation and thermoelectric properties of Al doped ZnO, *ceramics Materials Science and Engineering*, vol. 104, July 2003, pp. 45-48.
- [5] Michitaka Ohtaki, Toshiki Tsubota and Koichi Eguchi (1998). Thermoelectric Properties of Oxide Solid Solutions Based on Al-doped ZnO, *International Conference on Thermoelectric, Japan*.
- [6] C.K. Ghosh, S. Das and K.K. Chattopadhyay (2007). Enhancement of thermopower of Mn doped ZnO thin film, *Physica B*, vol. 399, May 2007, pp. 38-46.
- [7] Nararat Yong, Daengdesh Naenkieng, Pinit Kidkhunthod, Narong Chanlek, Nirawat Thammajak and Theeranun Siritanon (2017). Thermoelectric properties of Al and Mn double substituted ZnO, *Ceramics International*, vol. 43, August 2016, pp. 1695-1702.
- [8] Lihua Zhang, Tsuyoshi Toshio, Noriyuki Okinaka and Tomohiro Akiyama (2008). Thermoelectric Properties of Solution Combustion Synthesized Al Doped ZnO, *Materials Transactions*, Vol. 49, October 2008, pp. 2868 - 2874.
- [9] ทรงพล รอดทอง, รังสรรค์ เมืองเหลือ, โสภณ พรหมชัย และ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล (2547). กระบวนการโลหะของรอยสัมผัสไอทรมิคสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมครอนในประเทศไทย, *วิศวกรรมสาร* ฉบับที่ 21, มิถุนายน 2547, หน้า 49-55.
- [10] Chaniotakis and Cory (2006). *Circuit Analysis using the Node and Mesh Methods*, Spring.
- [11] รศ.ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ (2554). ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ, *ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*.
- [12] Morkoc H. and Ozgur U. (2009). *Fundamentals Materials and Device Technology Zinc Oxide*, Wiley-VCH.
- [13] Timothy J. Drummond, *Work Functions of the Transition Metals and Metal Silicides*.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศฤงคาร จันทรประทีป
วัน เดือน ปีเกิด	10 ตุลาคม พ.ศ. 2535
ที่อยู่	ต. ควนลิ่ง อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัยสมบูรณ์กุลกันยา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ทุนการศึกษา	ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้