

การพัฒนาคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
บิสมัทเทลลูไรด์

DEVELOPMENT OF THERMOELECTRIC CONCRETE BLOCK PRODUCED
FROM BISMUTH TELLURIDE THERMOELECTRIC MATERIALS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-030-093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF THERMOELECTRIC CONCRETE BLOCK PRODUCED
FROM BISMUTH TELLURIDE THERMOELECTRIC MATERIALS



THIDATIP JANJAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFLLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHTSICS SCHOOL OF SCIENE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2022-SC-M-030-093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิดาทิพย์ จันทระเจริญ
รหัสประจำตัว	62605042
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของปูนมอร์ตาร์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณแผ่นกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่ 0, 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 โดยน้ำหนักต่อคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตมอร์ตาร์ GO/CAST 11 LW (GMT) โครงสร้างของคอมโพสิต GMT ได้รับการตรวจสอบโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และ Raman spectroscopy (Raman) เกรนขนาดเล็กของ คอมโพสิต GMT ได้รับการยืนยันโดย Transmission Electron Microscopy (TEM) คุณสมบัติทางกลของคอมโพสิต GMT เพิ่มขึ้นตามปริมาณ GO ที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันจำนวนมากใน GO เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaH}_2\text{O}_4\text{Si}$; CSH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; CH) และเอตทริงไนต์ ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$; CA) ในปูนมอร์ตาร์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นสมบัติเชิงกลที่ดีในคอมโพสิต GMT ค่าฉนวนความร้อนของคอมโพสิต GMT ได้รับการปรับปรุงโดยอันตรกิริยาระหว่างเฟส CSH, CH และ CA ในซีเมนต์มอร์ตาร์บนพื้นผิวของ GO ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูงสุดและอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่ประมาณ 0.465 W/นาที่ ถูกสังเกตที่คอมโพสิต 0.05% ของ GO (GMT_0.05) ในอายุการบ่ม 7 วัน จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) เนื่องจากจากคุณสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้

คำสำคัญ : กราฟีนออกไซด์ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริก Bi_2Te_3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Thermoelectric Concrete Block Produced from Bismuth Telluride Thermoelectric Materials
Student Name	Miss Thidatip Janjaroen
Student ID	62605042
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2022
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chesta Ruttanapun

Abstract

This research in van der Waals heterostructures has been rapidly progressing in the This research has improved the mechanical and thermal properties of mortar for application as a thermoelectric generator. The influence of graphene oxide (GO) sheets at 0, 0.01, 0.03, 0.05 and 0.1 by weight on the mechanical and thermal properties of GO/CAST 11 LW (GMT) composite mortar was studied. The GMT composite was examined by X-Ray Diffraction (XRD) and Raman spectroscopy (Raman) techniques. GMT composites are confirmed by Transmission Electron Microscopy (TEM). The mechanical properties of GMT composites increase with increasing GO quantity. A lot of functional groups in GO such as carboxylic acid reacted with a calcium silicate hydrate, $\text{CaH}_2\text{O}_4\text{Si}$; CSH, Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; CH and Ettringite, and $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$; CA phases in the mortar, which can be considered good mechanical properties in the GMT composites. The heat insulation values of GMT composites were improved by the interaction with the CSH, CH, and CA phases in the cement mortar on the surface of GO. The highest compressive and tensile strengths and low heat transfer rate of about 0.465 W/min were observed at 0.05 of GO (GMT_0.05) composites in the curing age of 7 days. Bi_2Te_3 thermoelectric material is used

as a thermoelectric generator. Due to its thermal insulating properties, the power generation efficiency can be increased.

Keyword: Graphene oxide, Mechanical properties, Thermal properties, Thermoelectric, Bi_2Te_3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยอันเนื่องมาจากความช่วยเหลือของ รศ.ดร. เสรษฐา รัตนพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางที่ถูกต้องในงานวิจัย รวมถึงทุนสนับสนุน ตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ขอขอบคุณ ดร. ชัยวัฒน์ พรหมเพชร ดร. วัฒนา ต่วยไชย ดร. อรรถพล กาฬพันธ์ นักวิจัยหลังปริญญาเอก ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิจัยและนวัตกรรมวัสดุอัจฉริยะ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ความเข้าใจในการใช้อุปกรณ์ต่างๆภายในห้องแล็บ และได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำดำเนินงานอีกด้วย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาหาความรู้

นางสาวธิดาทิพย์ จันทรเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก.....	5
2.1.1 ปฏิกิริยาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	5
2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.1.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.2 บิสมัทเทลลูไรด์.....	10
2.3 กราฟีน.....	10
2.3.1 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	11
2.4 คอนกรีต.....	12
2.4.1 นิยามของคอนกรีต.....	12
2.4.2 องค์ประกอบของคอนกรีต.....	12
2.5 ปูนซีเมนต์ (Cement).....	12
2.6 ปูนสำเร็จรูป.....	13
2.7 การบ่มคอนกรีต.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 กรรมวิธีการบ่มคอนกรีต.....	13
2.8.1 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ.....	13
2.8.2 การบ่มที่อุณหภูมิสูง.....	14
2.9 ความแข็งแรง (Strength).....	14
2.10 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์.....	15
2.10.1 X-ray Diffractometer (XRD).....	15
2.10.2 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	16
2.10.3 รามานสเปกโตรสโคปี.....	16
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.1.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2 วิธีการทดลอง.....	21
3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์.....	21
3.2.2 การเตรียมแท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	22
3.2.3 การเตรียมเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยขั้วไฟฟ้า.....	22
3.2.4 การเตรียมเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสูงต่างกัน.....	24
3.2.5 การทดลองวัดไฟฟ้าเบื้องต้น.....	24
3.2.6 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบ.....	25
3.2.7 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของคอนกรีต.....	26
3.2.8 การทดสอบคอนกรีต.....	26
3.2.9 การฝังแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตบล็อก.....	29
3.2.10 การทดสอบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit.....	30
3.2.11 การทดสอบวัด I-V curve และ P-V curve.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การหาเงื่อนไขคอนกรีตทนไฟ CAST 11 LW ผสมกราฟีนออกไซด์.....	32
4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของคอนกรีต	32
4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกล.....	37
4.1.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน.....	40
4.2 การศึกษาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) ชนิดแท่งอินกอต.....	45
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	45
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก	46
4.2.3 ผลการศึกษาการทำขั้วไฟฟ้าแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	46
4.2.4 ผลการศึกษาความสูงของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	47
4.3 การศึกษาคอนกรีตอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	48
4.3.1 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit	48
4.3.2 ผลการวัด I-V curve และ P-V curve	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	58

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนและแผนดำเนินการวิจัย.....	4
2.1 แสดงสมบัติทั่วไปของบิสมัทเทลลูไรด์	10
3.1 อัตราส่วนผสมและปริมาณการเตรียมตัวอย่าง	25
4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1.....	37
4.2 กำลังรับแรงอัดและความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วันตามลำดับ.....	39
4.3 ค่าการนำความร้อน (K) ความต้านทานความร้อน (R) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (U) ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) ของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และคอมโพสิต GMT_0.1	43

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปราบการการณ์ซีเบค	6
2.2 ปราบการการณ์เพลเทียร์.....	7
2.3 โครงสร้างคาร์บอนอัญรูปต่างๆ ที่เกิดจากแผ่นกราฟีน	11
2.4 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน	12
2.5 หลักการทำงาน XRD	16
2.6 การเกิด scattering แบบต่างๆ.....	17
2.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนระดับพลังงานของ electron ในปราบการณ์ต่างๆ.....	17
3.1 กระบวนการเตรียมกราฟีนออกไซด์	22
3.2 กระบวนการเตรียมแท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	22
3.3 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1	22
3.4 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2	23
3.5 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3	23
3.6 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4	23
3.7 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสูง 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร.....	24
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดไฟฟ้าเบื้องต้น	24
3.9 กระบวนการขึ้นรูปตัวอย่าง.....	26
3.10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	27
3.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบ Direct tensile	27
3.12 การทดสอบการนำความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน	28
3.13 การถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรดของตัวอย่าง	29
3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การศึกษาผลต่างอุณหภูมิ.....	29
3.15 การเตรียมแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตบล็อก.....	30
3.16 การทดสอบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit	30
3.17 การทดสอบวัด I-V curve และ P-V curve	31
4.1 ภาพ TEM, ภาพกำลังขยายสูงและรูปแบบ SAED ของ (ก) GO sheets, (ข) GMT_0, (ค) GMT_0.05 และ (ง) สเปกตรัม Energy Dispersive X-ray (EDX) ของ GMT_0.05.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงรูปแบบ XRD ของแผ่น GO, GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 คอมโพสิตตามลำดับ.....	33
4.3 สเปกตรัมรามานของแผ่น GO, GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ.....	34
4.4 (ก) TGA curves และ (ข) DTG curves ของ GMT_0, GMT_0.03, GMT_0.05 ตามลำดับ.....	35
4.5 ภาพ SEM ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ.....	36
4.6 กราฟเปรียบเทียบของ (ก) กำลังรับแรงอัด และ (ข) % กำลังรับแรงอัด (ค) ค่าความต้านทานแรงดึง และ (ง) % ค่าความต้านทานแรงดึง ที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วันของ GMT_0, GMT_0.01 , GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 คอมโพสิตตามลำดับ.....	37
4.7 (ก) ความจุความร้อนเชิงปริมาตร (Cv) และ (ข) ค่าการนำความร้อน (K) และการกระจายความร้อน ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับเมื่ออายุบ่ม 7 วัน.....	40
4.8 ภาพความร้อนอินฟราเรดของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วันเป็นเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที.....	43
4.9 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างอุณหภูมิและ (ข) ภาพการแพร่ความร้อน ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	44
4.10 แสดงรูปแบบ XRD ของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi ₂ Te ₃) ชนิดแท่งอินกอต.....	45
4.11 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและ (ข) สภาพการนำไฟฟ้าของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi ₂ Te ₃) ชนิดแท่งอินกอต.....	46
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ากับผลต่างอุณหภูมิของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่การทำซ้ำไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	46
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และผลต่างอุณหภูมิของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสูง 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร.....	47
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และผลต่างอุณหภูมิของ GMT_0 และ GMT_0.05.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V curve) และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V curve) ของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีต GMT_0 และ GMT_0.05 ที่อุณหภูมิต่างๆ	49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

มนุษย์มีแนวโน้มที่จะใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ไฟฟ้าหลักในประเทศไทยผลิตจากก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน [1] ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปจึงทำให้ราคาสูงขึ้นในอนาคต ยิ่งไปกว่านั้นในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากจะถูกปล่อยออกมาทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกหรือภาวะโลกร้อน [2] ดังนั้นเราจึงสนใจพลังงานทางเลือกที่เป็นที่รู้จักกันดีในปัจจุบันคือพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลมพลังงานน้ำซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน แต่ทั้งหมดนี้ต้องใช้ต้นทุนที่สูงมากพื้นที่ขนาดใหญ่ในการติดตั้งและการก่อสร้างที่ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้นในการคิดค้นวิธีการใหม่ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อทดแทนพลังงานรูปแบบเก่าที่ดูเหมือนว่าจะขาดแคลนอย่างแน่นอนในอนาคต

ในปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) [3] วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความร้อนได้ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งหรือความร้อนที่มากเกินไปจากกิจกรรมของมนุษย์เช่นความร้อนจากหม้อไฟฟ้า ความร้อนในร่างกายของมนุษย์เช่นเดียวกับความร้อนจากธรรมชาติอื่นๆ เช่นความร้อนจากแสงอาทิตย์และสามารถสร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

นอกจากนี้งานวิจัยของ Karabetoglu S. et. al. [4] รายงานว่าอุณหภูมิ 250 K เป็นอุณหภูมิการทำงานเฉลี่ยสำหรับโมดูล Bi_2Te_3 โดยได้กำหนดการใช้อุณหภูมิของวัสดุสำหรับบริเวณอุณหภูมิ 100-375 K ผลลัพธ์คือของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก TEG ที่ใช้ Bi_2Te_3 สามารถใช้สำหรับการใช้งานอุณหภูมิต่ำ Lv S. et. al. [5] รายงานว่าการเติมวัสดุฉนวนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริก ประสิทธิภาพของโมดูลเติม aerogel นั้นสูงกว่าโมดูลที่ไม่ได้บรรจุ 8.225% แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของวัสดุเติมและอัตราการบรรจุ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมการก่อสร้างได้พยายามปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์โดยใช้วัสดุผสมระบบนาโนเทคโนโลยี [6-8] ถึงแม้ว่าวัสดุผสมซีเมนต์จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็พบการแตกร้าวในโครงสร้างในวัสดุเหล่านั้น ข้อเสียของวัสดุที่ใช้ซีเมนต์ควรได้รับการปรับปรุง เช่น มีแนวโน้มที่จะแตกร้าว ความเหนียวต่ำ ความต้านทานแรงดึงต่ำ และฉนวนที่ไม่ดี [9]

วัสดุนาโนทั่วไปรวมถึงวัสดุนาโนที่ทำจากคาร์บอน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) [10,11], คาร์บอนแบล็ค [12], เส้นใยนาโนคาร์บอน (CNFs) [13,14], MECNT [15], Graphene Oxide (GO) [16,17] และ reduced graphene oxide (rGO) [18-20] มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในฐานะสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติซีเมนต์ รวมถึงการแตกร้าว ความเหนียว ความต้านทานแรงดึง และฉนวนความร้อน กราฟีนออกไซด์เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ดีเนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงที่โดดเด่น คุณสมบัติพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และการกระจายตัวที่ดีขึ้นในตัวกลางที่เป็นน้ำ [21,22] Cao et al. [23] รายงานว่ามีการเพิ่มความต้านทานแรงดึงและกำลังรับแรงอัดอายุบ่ม 3 วัน ประมาณ 78.6% และ 38.9% ของคอมโพสิต cement-GO (0.03%) เนื่องจากการก่อตัวของผลึกคล้ายดอกไม้ Namsone et al. [24] รายงานว่า ส่วนผสมของสารละลาย GO กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มีอายุการบ่ม 28 วัน แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณ GO 0.05 wt% และความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณ GO 0.03 wt% Wang et al. [25] รายงานอิทธิพลของคอมโพสิต GO ต่อคอมโพสิตซีเมนต์มอร์ตาร์ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 63% ใน 1% ของคอมโพสิตนาโน GO-cement mortar ใน 28 วัน นอกจากนี้ กำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอมโพสิตซีเมนต์มอร์ตาร์ GO ที่ 0.03% ของ GO ถูกสังเกตที่ประมาณ 21.37% และ 53.77% ตามลำดับ [26] จากข้อมูลของ Phrompet et al. [27] สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมซีเมนต์ได้รับการปรับปรุงโดยคอมโพสิตระหว่าง rGO และซีเมนต์ C_3AH_6 แม้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตซีเมนต์จะมีความสำคัญในโครงสร้างพื้นฐานของอาคาร แต่คุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนก็มีประโยชน์ในการลดพลังงานสำหรับการทำความเย็นและความร้อนในอาคาร [28] ดังนั้น GO จึงเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ [29] นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณสมบัติของฉนวนความร้อนของวัสดุผสมซีเมนต์โดยการเพิ่ม GO ที่มีความเข้มข้นต่ำนั้นยังไม่ค่อยได้รับการศึกษา ซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเพื่อสร้างคอมโพสิตซีเมนต์คือปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ CAST 11 LW ประเภท insulating castable ASTM C 401 class O องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์คือ CaO (29.0%), Al_2O_3 (14.5%), SiO_2 (54.5%), Fe_2O_3 (0.5%) และ SO_3 (0.5%)

ดังนั้นในงานนี้ ผู้วิจัยได้ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของปูนมอร์ตาร์สำหรับนำไปเป็นคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้า จึงมีการตรวจสอบอิทธิพลของปริมาณแผ่น GO บนคอมโพสิตซีเมนต์มอร์ตาร์ CAST 11 LW ในด้านของกำลังอัด ความต้านทานแรงดึง และคุณสมบัติทางความร้อน คอมโพสิต GO/CAST 11 LW mortar (GMT) สังเคราะห์ที่มีปริมาณ GO ต่างกันโดยใช้เงื่อนไข 0, 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 wt% ถูกเตรียมและย่อเป็น คอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05

และ GMT_0.1 ตามลำดับ สันฐานวิทยาและโครงสร้างของคอมโพสิต GMT ตรวจสอบได้จาก XRD TEM, SEM, และ Raman spectroscopy ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) เพื่อศึกษาอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์ชนิดแท่งอินกอต
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อก
- 4) เพื่อสร้างต้นแบบคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำขั้วไฟฟ้าและทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์สำหรับนำไปฝังในคอนกรีตบล็อก และศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตผสมกราฟีนออกไซด์ (GO) ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิตรที่สัดส่วนผสม 0.01%, 0.03%, 0.05% และ 0.1% โดยน้ำหนักของปูนมอร์ตาร์ เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) ทราบถึงการส่งผลของกราฟีนออกไซด์ต่อสมบัติเมื่อนำมาคอมโพสิตกับคอนกรีต
- 3) ทราบถึงการนำวัสดุบิสมัทเทลลูไรด์มาใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ
- 2) สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide: GO)
- 3) สร้างและทดสอบเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก
- 4) สร้างและทดสอบคอนกรีตบล็อกและคอนกรีตบล็อกคอมโพสิตกราฟีนออกไซด์
- 5) นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ
- 6) สร้างและทดสอบคอนกรีตบล็อกผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 8) นำเสนอผลงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) เขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนและแผนดำเนินการวิจัย

การดำเนินการ	ระยะเวลา					
	ส.ค.-ต.ค. 2563	พ.ย.-ม.ค. 2564	ก.พ.-เม.ย. 2564	พ.ค.-ก.ค. มี.ค. 2564	ส.ค.-พ.ย. 2564	ธ.ค.-มี.ย. 2565
ขั้นตอนที่ 1						
ขั้นตอนที่ 2						
ขั้นตอนที่ 3						
ขั้นตอนที่ 4						
ขั้นตอนที่ 5						
ขั้นตอนที่ 6						
ขั้นตอนที่ 7						
ขั้นตอนที่ 8						
ขั้นตอนที่ 9						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการรวมคำระหว่างคำว่า “เทอร์โม (thermo)” ที่มีความหมายว่าความร้อน และคำว่า “อิเล็กทริก (electric)” ที่มีความหมายว่าไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็น “ความร้อนและไฟฟ้า”

2.1.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยจะทำการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ในการผันพลังงานจะอาศัยวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) กล่าวคือ เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างปลายทั้งสองข้าง จะเกิดการถ่ายเทอุณหภูมิจากสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ คือการสั่นของอนุภาคโฟนอน (phonon) และการเคลื่อนที่ของพาหะทั้งอิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา ในขณะที่เดียวกันยังสามารถผันกลับจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จะมีการถ่ายเทความต่างศักย์ไฟฟ้าจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิขึ้นที่ปลายทั้งสองข้างของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และได้พลังงานความร้อนในที่สุด

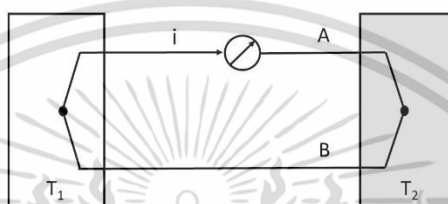
2.1.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) [30]

ในปีค.ศ.1821 โทมัส โยฮัน ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเอสโตเนีย กล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะเกิดกระแสไหลในวงจรปิด”

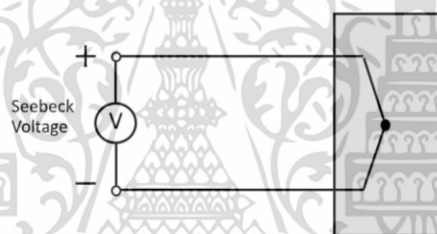
เขาได้ค้นพบโดยบังเอิญจากการทดลอง เมื่อนำโลหะตัวนำต่างชนิดกันสองตัว คือบิสมัทกับทองแดงมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน แล้วให้ความร้อนที่จุดต่อด้านหนึ่ง ปรากฏว่าสามารถทำให้เข็มทิศเบนได้ ในตอนแรกซีเบคเข้าใจว่าเป็นอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากความต่างของอุณหภูมิ ในภายหลังซีเบคได้เข้าใจแล้วว่าที่เข็มทิศเบนได้ เป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยแรงที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิดได้นั้น เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ปลายต่อของโลหะต่างชนิดกัน โดยแรงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า และได้เรียกปรากฏการณ์ที่ได้

ถูกค้นพบว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) มักถูกนำมาใช้สำหรับการเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ซึ่งถูกเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric power generator : TEG)

สามารถสรุปการค้นพบได้ว่า เมื่อโลหะนำไฟฟ้าสองชนิดถูกต่อเข้าด้วยกัน และปลายทั้งสองด้านของรอยต่อมีอุณหภูมิแตกต่างกันแล้ว ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรของเส้นลวดดังรูปที่ 2.1 (ก) ค่าของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และเมื่อเป็นวงจรมีเปิดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น เรียก แรงดันซีเบค (Seebeck voltage) ดังรูปที่ 2.1 (ข) [31]



รูป (ก)



รูป (ข)

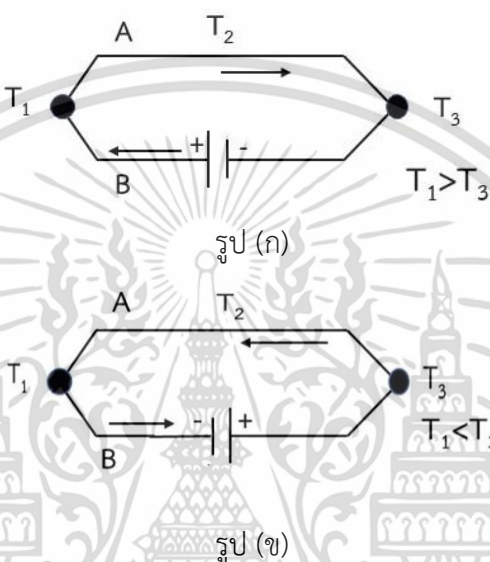
รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค

2.1.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)

ในปีค.ศ.1834 ฌอง ชาร์เลส อธาเนส เพลเทียร์ (Jean Charles Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า”

ได้ทำการทดลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโลหะทองแดงและบิสมัทที่เชื่อมต่อกัน ผลที่เกิดขึ้น คือ รอยต่อระหว่างทองแดงและบิสมัทข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น ส่วนอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง อันเป็นผลจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดกลุ่มอิเล็กตรอน เคลื่อนผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน (Heat evolved) แต่อีกด้านหนึ่งจะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ โดยเกิดขึ้นสอดคล้องกับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า

ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้จุดต่อ T_1 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ T_3 ดังรูปที่ 2.2 (ก) และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้จุดต่อ T_3 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ T_1 ดังรูปที่ 2.2 (ข) [32] จากปรากฏการณ์นี้จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler : TEC) และตัวทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater : TEH)



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

จากกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์ เป็นกระบวนการที่สามารถกำเนิดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานย้อนกลับกระบวนการ (Reverse operation) กันได้

2.1.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ในปีค.ศ. 1854 วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือ หลอด เคลวิน (Lord Kelvin) นักฟิสิกส์ชาวสก๊อต กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อนหรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น”

ทอมสันได้ใช้ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ซีเบคและเพลเทียร์ ทำให้ทอมสันได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่ 3 คือความร้อนสามารถถูกดูดหรือคายในวัสดุได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุในขณะที่วัสดุมีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (เกรเดียนต์อุณหภูมิ) โดยที่ความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงทั้งกระแสไฟฟ้าและเกรเดียนต์อุณหภูมิในวัสดุ ได้เรียกค่าสัดส่วนคง

ที่นี้ว่า สัมประสิทธิ์ทอมสัน (Thomson coefficient) และได้เรียกการค้นพบนี้ว่า ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

จากการศึกษาของทอมสัน ทำให้เข้าใจว่า ทั้งปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์นั้น เป็นปรากฏการณ์ที่สัมพันธ์เกี่ยวโยงกัน โดยสัมพันธ์ผ่านเทอร์โมไดนามิกส์

2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [33]

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ นั่นคือสามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เกิดขึ้นได้ในตัวเอง เมื่อวัสดุมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตัววัสดุตามปรากฏการณ์ซีเบค และยังสามารถเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิได้เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่วัสดุตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ ปรากฏการณ์ทั้งสองย้อนกลับหากันได้ตามปรากฏการณ์ทอมสัน

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่รู้จักโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้ BiSb, CsBi₂Te₃, Bi₂Te₃Zn₄Sb₃, CoSb₃, PbTe Ag-Sb-Ge-Te (TAGS), Ag-Sb-Pb-Te (LAST), SiGe, Mg₂Si, Mg₂Sn, MnSi, FeSi, Bi₂SrcCoO, NaCoO₂, Ca₃Co₄O₉, SrTiO₃, CaMnO₃, ZnO วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุชนิด-p (p-type) และ วัสดุชนิด-n (n-type) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-p (p-type) ได้แก่ Sb₂Te₃, PbTe, PbTeSe, TAGS, SiGe, NaCoO₂, Ca₃Co₄O₉ และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-n (n-type) ได้แก่ Bi₂Te₃, PbTe, CoSb₃, SiGe, ZnO, SrTiO₃, CaMnO₃

2.1.2.1 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกประเภทสารกึ่งตัวนำ มีการพบว่า ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

- สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าสูงแต่ เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
- สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มาก
- มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ

คุณสมบัติทั้ง 3 ประการ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการที่ 2.1 สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z)

$$Z = \frac{S^2\sigma}{K} \quad (2.1)$$

โดยที่ S คือสัมประสิทธิ์ซีเบค (Volt/Kelvin)

σ คือสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampere/Volt*meter)

และ K คือสภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt/meter*Kelvin)

โดยส่วนใหญ่แล้ว Z ขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงอุณหภูมิของสารแต่ละประเภท ดังนั้นการพิจารณาค่า Z ต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิด้วย จึงมีการคูณสมการ 2.1 ด้วย T จะได้สมการใหม่ดังสมการ 2.2

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{K} \quad (2.2)$$

2.1.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก [33]

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบ และต้องสามารถแสดงปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ คือต้องสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และสามารถผันกลับโดยเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ด้วย

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกถูกประดิษฐ์ขึ้นมีลักษณะเป็นโมดูลเรียกว่า โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก 1 ตัว ประกอบด้วยเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 เซลล์ เป็นเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-เอ็น จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-เอ็น และเป็นเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-พี จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-พี อย่างละ 1 เซลล์ นำมาต่อกับแผ่นตัวนำบาง เช่น ทองแดงบาง (Copper plate) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านระหว่างเซลล์ทั้ง 2 ได้ แล้วประกบด้านบนกับด้านล่างของชุดเซลล์ดังกล่าว ด้วยแผ่นฉนวนไฟฟ้าแต่ทำความร้อนได้ดี เช่น อลูมินาบาง (Alumina plate) เพื่อให้ความร้อนไหลผ่านได้และเพื่อเป็นฉนวนทางไฟฟ้า จากนั้นนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลมาประกอบกัน เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ด้านการทำงาน คือ ด้านเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า และด้านเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

2.1.3.1 ด้านเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

เป็นด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวอุปกรณ์ให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ในด้านนี้จึงใช้สำหรับการเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ถูกเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric power generator : TEG) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถประยุกต์เป็นตัวผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนต่างๆได้

2.1.3.2 ด้านเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

เป็นด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือด้านร้อน/เย็น) ที่แต่ละด้านของอุปกรณ์ อุปกรณ์ประเภทนี้

สามารถแยกออกได้เป็น 2 รูปแบบคือเป็นตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler : TEC) และเป็นตัวทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater : TEH)

2.2 บิสมัทเทลลูไรด์

บิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) มีลักษณะเป็นผงสีเทาซึ่งเป็นสารประกอบของบิสมัทและเทลลูเรียม เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทั่วไปของบิสมัทเทลลูไรด์ [34]

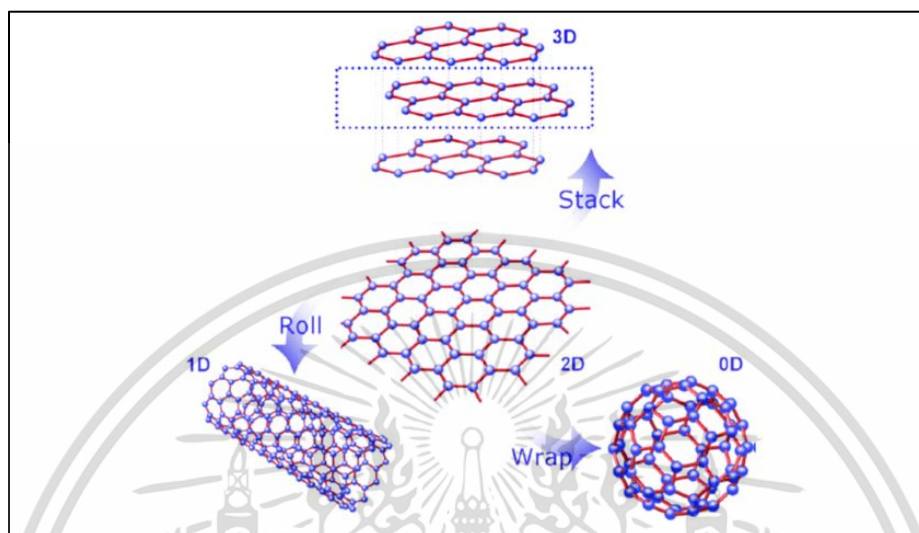
ชื่อธาตุ: Bismuth Telluride	ความบริสุทธิ์: 99.99%
สูตรเคมี: Bi_2Te_3	สถานะ: ของแข็ง
มวลโมเลกุล: 800.76 g/mol	การละลายน้ำ: ไม่ละลายน้ำ
ความหนาแน่น: 7.74 g/cm ³	โครงสร้างผลึก: Trigonal
จุดหลอมเหลว: 580 °C	Lattice constant: a=0.4395 nm, c=3.044 nm
สี: เทา	CAS number: 1304-82-1

2.3 กราฟีน

กราฟีนถูกสังเคราะห์ครั้งแรกเมื่อ ปีพ.ศ.2547 โดยศาสตราจารย์ ดร.อังเดร ไกม์ และศาสตราจารย์ ดร.คอนสแตนติน โนโว เชลอฟ นักฟิสิกส์ชาวรัสเซีย จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ โดยการนำสก็อตเทปทาบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออก ทำให้เห็นถึงชั้นของกราฟีนติดอยู่บนสก็อตเทป [35]

กราฟีน คือ วัสดุในสองมิติที่มีโครงสร้างเป็นอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) มีไฮบริดไดเซชัน (hybridization) แบบ sp^2 ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง ลักษณะโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง ด้วยความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียว จึงทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไปจากคาร์บอนอัญรูปอื่นๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้กราฟีนมีความแข็งแรงกว่าเพชร และแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าถึง 200 เท่า มีน้ำหนักเบา ความยืดหยุ่นสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องมีมากถึง 200,000 $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ [36] และโครงสร้างพื้นผิวของกราฟีนยังมีลักษณะโค้งงอ ม้วน หรือพับได้คล้ายกับเกลียวคลื่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟีนยังสามารถประกอบเป็นโครงสร้างคาร์บอนอัญรูปอื่นๆได้ [37] อาทิเช่น ถ้านำแผ่นกราฟีนมาต่อกันเป็นชั้นๆ ก็จะได้วัสดุสามมิติหรือเรียกว่ากราไฟต์ แต่ถ้านำแผ่นกราฟีนมาม้วนเป็นทรงกระบอกก็จะได้ วัสดุหนึ่งมิติหรือ

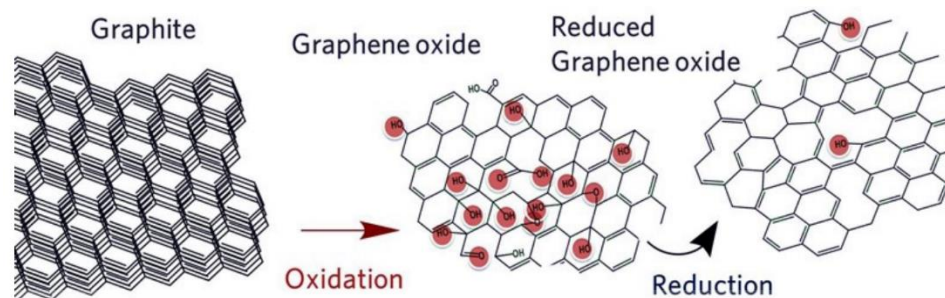
เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) และถ้าแผ่นกราฟีนถูกห่อให้เป็นทรงกลมก็จะได้วัสดุศูนย์มิติหรือเรียกว่า ฟูลเลอร์ีน (fullerenes) หรือบัคกี้บอล (buckyballs) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างคาร์บอนอัญรูปต่างๆ ที่เกิดจากแผ่นกราฟีน [38]

2.3.1 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การหลุดลอกออกด้วยวิธีการทางเคมี (chemical exfoliation) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์กราฟีนและเป็นวิธีการที่นิยมมากในระดับอุตสาหกรรม เนื่องด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้กราฟีนในปริมาณมาก การสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะใช้ วิธี Modified Hummer's method (Hummers, W.S. and Offeman, R.E., 1958) [39] เป็นการสังเคราะห์กราฟีนจากแกรไฟต์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน โดยขั้นตอนแรก แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) ในสภาวะที่เป็นกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) จะทำให้ได้แกรไฟต์ออกไซด์ ลำดับถัดมานำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง คือการทำการอัลตราโซนิก (sonication) ด้วยคลื่นความถี่สูง เพื่อให้แกรไฟต์ออกไซด์ในแต่ละชั้นหลุดออกมาจากโครงสร้างของแกรไฟต์ออกไซด์กลายเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์จะกระจายตัวอยู่ในเฟสของตัวทำละลายที่เป็นน้ำ โดยขั้นตอนที่สองนี้จะได้กราฟีนออกไซด์ และในขั้นตอนสุดท้าย กราฟีนออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอนที่สองจะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีน (Hydrazine) เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันบนแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ในขั้นสุดท้ายจะทำให้ได้วัสดุรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน [40]

2.4 คอนกรีต

2.4.1 นิยามของคอนกรีต [41]

คอนกรีต คือวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นวัสดุเปรียบเสมือนหินที่ใช้เป็นโครงสร้าง จากการผสมซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้ซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานแทรกเม็ดทรายและหินรวมตัวกันเป็นก้อนคอนกรีตในแบบหล่อ จะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นอยู่ตามอายุการบ่มคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสานได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต และมวลรวมได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้

2.4.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้ มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทรายเรียกว่า มอร์ต้า (Mortar) มอร์ต้าผสมกับหินหรือกรวดเรียกว่า คอนกรีต (Concrete)

2.5 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนต่างๆ รวมตัวกันพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาบางส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้นมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกตที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วได้สารประกอบแคลเซียมซิลิไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดเป็นของเหลวหนืด ซึ่งทำหน้าที่

หล่อลื่นคอนกรีตที่สามารถเทได้และยึดประสานมวลรวมเข้าด้วยกันเมื่อแข็งตัวจะให้กำลังกับคอนกรีต คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ สารเคมีและความละเอียดของเม็ดปูน

2.6 ปูนสำเร็จรูป [42]

ปูนสำเร็จรูปหรือปูนมอร์ตาร์สำเร็จรูปเป็นปูนที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ หินบดละเอียด และสารพิเศษ โดยจะมีการควบคุมสัดส่วนการผสมและคุณภาพของวัตถุดิบให้มีความสม่ำเสมอและสะดวกต่อการใช้งาน สามารถผสมน้ำและใช้งานได้ทันที โดยไม่ต้องผสมทรายหรือสารเคมีเพิ่มเติม ซึ่งปูนแต่ละถุงจะแยกประเภทการใช้งานมาให้ ไม่ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์สำเร็จรูปสำหรับงานก่อทั่วไป งานฉาบทั่วไป งานฉาบละเอียด งานเทพรับพื้น และงานซ่อมแซมเนกประสงค์

2.7 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตคือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลทำให้คอนกรีตมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยการรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

2.8 กรรมวิธีการบ่มคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันแรกๆ ถ้าได้รับการบ่ม มีโอกาสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังอายุ 28 วัน อัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง แต่ยังเพิ่มขึ้นตลอดเวลาหากได้รับการบ่มที่ดี หากขาดความชื้น กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นสักกระยะหนึ่ง เนื่องจากความชื้นที่เหลืออยู่ แต่หลังจากนั้นกำลังอัดจะไม่เพิ่มขึ้นอีก

2.8.1 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ

2.8.1.1 การบ่มคอนกรีตโดยการเพิ่มน้ำ

วิธีนี้เป็นการเพิ่มน้ำหรือความชื้นให้ผิวหน้าคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่กำหนด น้ำที่ใช้บ่มควรมีคุณภาพสอดคล้องตามมาตรฐาน ไม่มีสารเจือปนที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือทำให้คอนกรีตผิวคอนกรีตเปลี่ยนสี และหลีกเลี่ยงการใช้น้ำบ่มที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10°C เพราะจะทำให้ผิวคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทันทีทำให้เกิดการแตกร้าวได้ (Thermal Shock) ทำได้หลายวิธี ได้แก่ กางขังน้ำหรือการแช่น้ำ การฉีบน้ำหรือการพรมน้ำ และการใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม

2.8.1.2 การบ่มคอนกรีตโดยการป้องกันการสูญเสียความชื้น

วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอกโดยการใช้วัสดุปิดทับ (Autoclave) ทำหน้าที่เป็นแผ่นคลุม หรือเป็นฟิล์มเคลือบผิวคอนกรีต เพื่อลดการสูญเสีย

สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้สารเหลวบ่มคอนกรีตหรือน้ำยาบ่มคอนกรีต การใช้แผ่นพลาสติกคลุม และการใช้กระดาษกันน้ำซึมได้คลุม

2.8.2 การบ่มที่อุณหภูมิสูง

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงหรือการบ่มแบบเร่งกำลัง สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว นิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และแผ่นพื้น ปัจจัยในการบ่มแบบนี้ ได้แก่ ระยะเวลาที่จะเริ่มบ่ม อัตราการเร่งอุณหภูมิอุณหภูมิสูงสุดของการบ่ม ระยะเวลาการคงอุณหภูมิสูงสุดไว้ และอัตราการลดอุณหภูมิ ปัจจัยเหล่านี้ควรได้มาจากผลการทดสอบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลเสียต่อคอนกรีตที่บ่ม

2.8.2.1 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40-100 °C ส่วนอุณหภูมิที่ให้ผลดีที่สุดอยู่ระหว่าง 65-80 °C การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังอัดและกำลังสูงสุดที่ต้องการ ในขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิ ควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 2-6 ชั่วโมงหลังการหล่อ ก่อนที่จะสัมผัสกับไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเบื้องต้นก่อน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิไม่ควรเกิน 30 °C ต่อชั่วโมง และอัตราการลดอุณหภูมิควรอยู่ระหว่าง 20-30 °C การบ่มด้วยไอน้ำนี้เพื่อให้ได้กำลังสูงพอที่ให้ความปลอดภัยต่อการถอดแบบและการขนย้ายเท่านั้น จากนั้นบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นตามปกติ

2.8.2.2 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง

การบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิสูงเกิน 100 °C เราต้องให้ความดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิท อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 160-210 °C ที่ความดัน 6-20 atm สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารประกอบ จากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C ส่งผลคือ สามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมงเพราะคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติเป็นเวลา 28 วัน มีการหดตัวและการล้าลดลงมาก ทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้น กำจัดซึ่เกลือปูน (Efflorescence) มีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม แต่การบ่มแบบนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงและใช้ได้กับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น มีการใช้การบ่มนี้สำหรับผลิตภัณฑ์จำเพาะบางอย่าง เช่น แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ยี่ห้อ

2.9 ความแข็งแรง (Strength)

ความแข็งแรงหมายถึงความสามารถในการรับแรงในขณะที่เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นภายในวัสดุ การศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุจะศึกษาเกี่ยวกับแรงภายในวัสดุกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของวัสดุนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความแข็งแรงคือความสามารถที่จะต้านทานแรงที่มากระทำโดยไม่เกิดการแตกหัก

แรงที่เกิดขึ้นภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง เรียกว่าแรงเค้น (Stress) วัดเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงมากระทำ เรียกว่า ความเครียด (Strain) ทั้งความเค้นและความเครียดนี้มีผลต่อความแข็งแรง ทั้งนี้เพราะการวัดความแข็งแรงจะได้รับการหาค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักเสียรูปทรง หรือจะออกมาในรูปของค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus)

ความแข็งแรงแบ่งได้เป็น 7 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากระทำได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength หรือ Yielded Strength) ความแข็งแรงต่อแรงเฉือน (Shear Strength) ความแข็งแรงต่อแรงคด (Bending Strength) ความแข็งแรงต่อแรงกด (Bearing Strength) ความแข็งแรงต่อแรงบิด (Torsion Strength) ความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive Strength) ความแข็งแรงต่อแรงกระทบกระแทก (Impact Strength)

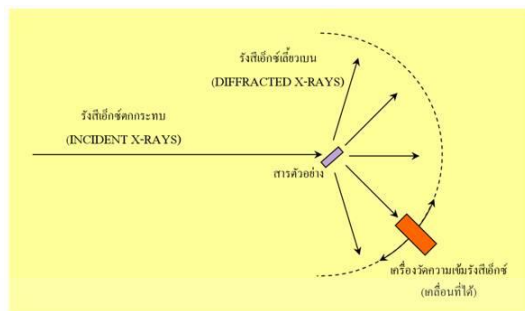
2.11 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

2.11.1 X-ray Diffractometer (XRD) [43]

เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

2.11.1.1 หลักการทำงาน

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการทำงาน XRD [44]

โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

2.1.1 Thermogravimetric Analysis (TGA) [45]

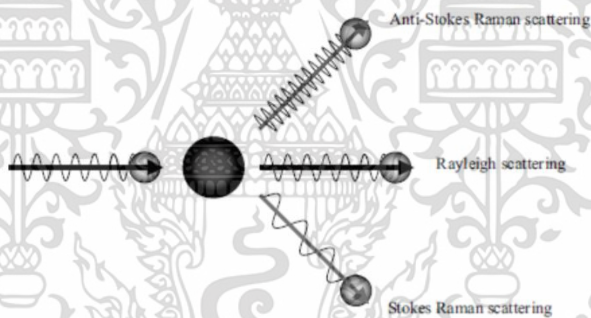
เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่นไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่นอากาศหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

2.1.1.3 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

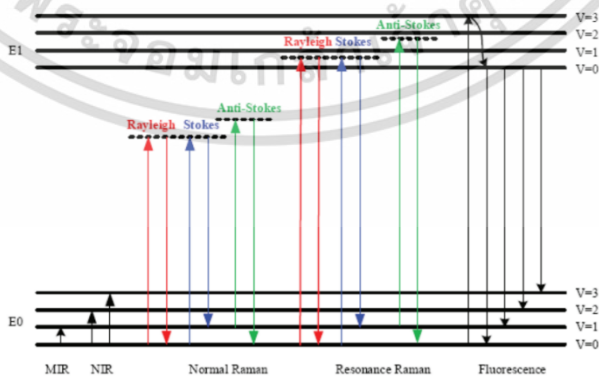
Raman spectroscopy เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ทำงาน โดยอาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman scattering) เนื่องจากสารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกันของสาร

2.11.3.1 หลักการทำงาน [46]

การวิเคราะห์โดย raman spectroscopy อาศัยหลักการกระเจิงของแสงที่เกิดจากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลของสารสมมติให้แสง laser ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารของเหลวที่โปร่งแสงจะมีอนุภาคแสงจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไป ขณะที่บางส่วนจะชนเข้ากับโมเลกุลสารแล้วเปลี่ยนทิศทางในการชนกันนั้นโดยส่วนมากพลังงานของแสงหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง เป็นการชนแบบยืดหยุ่น ที่เรียกว่า Rayleigh scattering แต่จะมีอนุภาคแสงส่วนน้อยที่พลังงานหลังการชนเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับโมเลกุลของสาร หรือเรียกว่าเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น โดยแสงอาจมีความถี่มากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานหลังเกิดการชนนี้เรียกว่า raman scattering หากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลในสภาวะพื้น ความถี่หลังการชนจะลดลง เรียกว่า stokes raman scattering แต่หากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น ความถี่หลังการชนจะเพิ่มขึ้น เรียกว่า anti-stokes raman scattering ดังรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้วนิยามวัดการเกิด stokes raman scattering เนื่องจากสารจะอยู่ในสภาวะพื้น นอกจากนี้สารแต่ละชนิดจะเปลี่ยนความถี่ของแสงได้แตกต่างกันและยังให้ความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมาไม่เท่ากันอีกด้วย



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิด scattering แบบต่างๆ [46]



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนระดับพลังงานของ electron ในปรากฏการณ์ต่างๆ [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Mater Chem et al. [47] ได้ทำรายงานว่า บิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่รู้จักกันดีในเชิงพาณิชย์มีหลากหลายรูปแบบ ใช้สำหรับการระบายความร้อน อย่างไรก็ตามค่า ZT ประมาณ 1 นั้นจำกัดการใช้งาน จากการศึกษาล่าสุดระบุว่าโครงสร้างนาโนสามารถปรับปรุง ZT ในขณะที่ยังคงรักษารูปแบบของวัสดุ โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ชั้นสูงสังเคราะห์ทางเคมีโดยใช้เทคนิคการสปาร์กพลาสมาซินเทอริง ใช้ในการบดอัดและการเผา อนุภาคนาโนของ Bi_2Te_3 ทำให้มีความหนาแน่นสูงมาก (> 97%) ในขณะที่ยังคงโครงสร้างนาโน ขนาดเกรนเฉลี่ยของคอมแพคสุดท้ายได้รับเป็น 90 ± 5 นาโนเมตรโดยคำนวณจากอิเล็กตรอนไมโครกราฟ การประเมินคุณสมบัติพบว่าสัมประสิทธิ์ Seebeck เพิ่มขึ้น ($-120 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$) และใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ ZT ที่ปรับปรุงแล้วสำหรับ Bi_2Te_3 ที่ไม่ได้เติมสารมีค่าสูงสุดประมาณ 1.1 ที่ 340 เคลวิน

นายจักรกฤษ กอบพันธ์ [48] ได้ทำรายงานว่า การสร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจาก สารประกอบ CaMnO_3 จำนวน 20 โมดูล ในขณะเดียวกันทำการออกแบบคอนกรีตบล็อกและการหล่อ คอนกรีตเพื่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยได้ทำการออกแบบคอนกรีตบล็อก ขนาด $17 \times 17 \times 3.5$ เซนติเมตร เมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์และคัดสรรวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อสร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเสร็จสมบูรณ์ หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษา คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏว่าคอนกรีตบล็อกสามารถสร้าง แรงดันไฟฟ้าได้ 1.487 โวลต์ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส และได้ทดลองให้ความร้อนแก่คอนกรีต บล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาว่าคอนกรีตบล็อก เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้ในตัวเองหรือไม่ จากการทดลองปรากฏว่า คอนกรีต บล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้คงที่ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ หลังให้ความร้อนผ่านไป 1 ชั่วโมง และคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าก็สามารถที่จะสร้างแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมาได้คงที่

C. Lertsatillhanakorn et al. [49] ได้ทำรายงานว่า แนวคิดของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ห้วพาราโบลาและโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก นำเสนอในการศึกษานี้ เครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยตัวเก็บจานพาราโบลาที่มีรัศมีแสง 1.5 เมตร ที่ใช้ในการรวมแสงอาทิตย์กับจานรับสัญญาณที่มีพื้นที่ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลหนึ่งตัวที่ใช้ Bi_2Te_3 ติดตั้งบนแผ่นรับใช้เพื่อแปลงพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ช่องระบาย

ความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าคู่กับพัดลมถูกใช้เพื่อระบาย ความร้อนจากด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และใช้ระบบติดตามเพื่อติดตามดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ศึกษาผลของการวางแนวพัดลมและอัตราการไหลของอากาศ ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิต 1.32 W ที่ 0.42 m³/นาที่ของอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการแปลง 2.89% แนวคิดที่เสนอนั้น น่าเชื่อถือและได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติม

S. Inthachai et al. [50] ได้ทำรายงานว่า ในการศึกษางานวิจัยนี้คอนกรีตบล็อกปูพื้นเทอร์โมอิเล็กทริกถูกสร้างขึ้นเป็นรูปทรงบล็อกแปดเหลี่ยม ขนาด 198×198×60 มม. พื้นผิวสำหรับรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกปูพื้นเทอร์โมอิเล็กทริกคือ 860 kN ตามที่มอก. มีการกำหนด คือ 827-2531: โดยบล็อกคอนกรีตปูพื้นใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสาร Bi₂Te₃ และ Sb₂Te₃ ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการให้แรงดันความร้อน โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกถูกประดิษฐ์โดยการบัดกรี และถูกวัดอุณหภูมิ 25-75 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 73.91 mV ที่อุณหภูมิต่างกัน 6.2 องศาเซลเซียส

Wicklein et al. [51] ได้เพิ่ม GO และ sepiolite clay nanorods (SEP) ให้กับ CNF เพื่อพัฒนาโพลิเมอร์ที่มีฉนวนกันความร้อนสูงซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุฉนวนได้ फिल्मมีค่าการนำความร้อน 15mWm⁻¹K⁻¹ ซึ่งต่ำกว่าวัสดุฉนวนทั่วไปเช่น PS, PU และฉนวนใยแร่ที่มีการนำความร้อนที่ 35, 25 และ 35mW⁻¹K⁻¹ ตามลำดับ โพลิเมอร์ที่มีรูพรุนเกิดจากการหล่อเย็นคอลลอยด์แขวนลอยของวัสดุทั้งสามชนิด เมื่อผ่านการทดสอบเปลวไฟในแนวตั้งโพลิเมอร์จะหยุดเปลวไฟจากการแพร่กระจายตัวเองและมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (pkHRR) ต่ำกว่าโพลิเมอร์ CNF เพียงอย่างเดียว 25%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 3) เครื่อง Raman spectrometer
- 4) เครื่อง Thermogravimetric Analyzer
- 6) เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน
- 7) เครื่องทดสอบแรงดึง
- 8) เครื่องทดสอบแรงอัด
- 9) เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) บล็อกสำหรับอัด
- 11) เครื่องอัดไฮดรอลิก
- 12) หัวแรงบีดกรี
- 13) Silver conductive paint
- 14) ตะกั่ว
- 15) แผ่นทองแดง
- 16) สายไฟ
- 17) เครื่องผสม
- 18) เครื่องกวนสาร
- 19) พิวเจอร์บอร์ดสำหรับทำแม่แบบ
- 20) เตาให้ความร้อน
- 21) มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 22) กล้องถ่ายภาพความร้อน
- 23) แม่แบบสำหรับหล่อคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

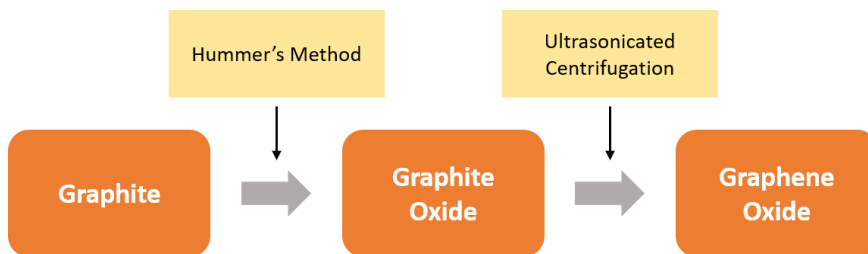
3.1.2 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- 1) บิสมัทเทลลูไรด์ชนิดแท่งอินกอต
- 2) กราฟีนออกไซด์
- 3) น้ำสะอาด
- 4) ปูนมอร์ตาร์ (ปูนทนไฟ CAST 11 LW)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์

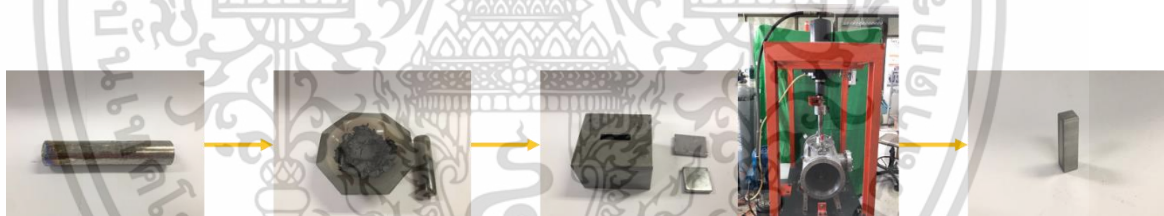
กราฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์โดยวิธี Hummers โดยการ ออกซิไดซ์กราฟีนด้วยกรดแก่และตัวออกซิไดซ์ นำผงแกรไฟต์ บริสุทธิ์ 99% (Graphite powder) 2 กรัม ผสมกับ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate : KMnO_4) 6 กรัม ผสมลงในบีกเกอร์ขวดก้นกลม 500 มิลลิลิตร และทำให้อุณหภูมิเย็นลงที่ 0°C 29 หลังจากนั้นทำการเติมกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid : H_2SO_4) 46 มิลลิลิตร ภายใต้การกวนและความ เย็นด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 15°C และกวนส่วนผสมที่ 40°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร จะถูกเติมอย่างช้าๆ และอุ่นส่วนผสมภายใต้การกวนที่ 95°C เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นปฏิกิริยาก็หยุดลงโดยการเติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตรและเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide : H_2O_2) 10 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกแยกด้วยการ บั่นแยกและล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCl) 5% เพื่อลดซัลเฟต หลังจากนั้นก็ทำการกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งจนกระทั่งค่าความเป็นกรดต่างของ สารละลายที่กรองได้เป็นกลาง ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จะถูกนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงแกรไฟต์ออกไซด์สังเคราะห์ 800 มิลลิกรัม และถูกนำมาละลายอีกครั้งในน้ำกลั่น (120 มล.) ภายใต้การอัลตราโซนิกเป็นเวลา 90 นาทีและตามด้วยการ Centrifugation เป็นเวลา 20 นาที ที่ 5000 รอบต่อนาที ก็จะได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้มออกมา คือ กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมกราฟีนออกไซด์

3.2.2 การเตรียมแท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

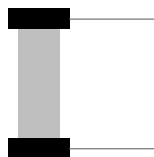
- 1) นำแท่งอินกอตบิสมีทเทลลูไรด์มาตัดแบ่งให้มีขนาดเล็กลง
- 2) นำไปบดละเอียดด้วยครกหยกบดสาร
- 3) นำบิสมีทเทลลูไรด์ที่เป็นผงละเอียดมาชั่ง โดยใช้มวล 3.8 กรัม
- 4) นำไปบรรจุลงบล็อกอัด ขนาด 2x0.5 เซนติเมตร
- 5) อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ที่ความดัน 1000 psi เป็นเวลา 5 นาที
- 6) จะได้แท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ขนาด 0.5x0.5x2 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียมแท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

3.2.3 การเตรียมเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ

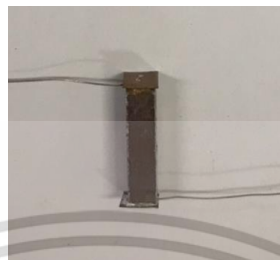
- 1) ทำตามขั้นตอน 1-6 ในข้อ 3.2.2
- 2) ทำขั้วไฟฟ้าขึ้นรูป filament นำไฟฟ้าด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อที่จะนำมาสวมเข้าที่ขั้วแท่งเซลล์โดยที่มีรูสำหรับสายไฟด้วย



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทำขั้วไฟฟ้าโดยการทา Silver conductive paint ที่แท่งเซลล์ ใช้ตะกั่วบัดกรีเชื่อมระหว่างแผ่นทองแดงกับสายไฟ และนำไปเชื่อมต่อกับแท่งเซลล์



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2

4) ทำขั้วไฟฟ้าโดยการใช้แผ่นทองแดงที่มีความกว้าง 0.5 cm ซึ่งมีขนาดเท่าหน้าตัดแท่งเซลล์ แทนสายไฟ เชื่อมกับแท่งเซลล์ด้วยกาวเงิน และประกบด้วยบล็อกพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยมีช่องไว้สำหรับแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3

5) ทำขั้วไฟฟ้าโดยการเชื่อมระหว่างแผ่นทองแดง สายไฟ และแท่งเซลล์ ด้วยกาวเงิน โดยมีบล็อกพอลิเมอร์ประกบ

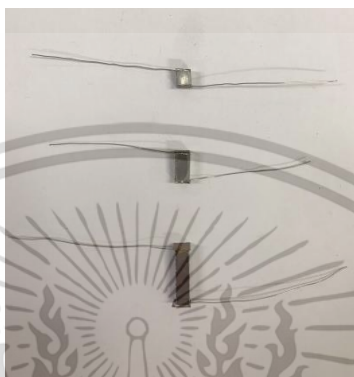


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเตรียมเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสูงต่างกัน

- 1) ทำตามขั้นตอน 1-6 ในข้อ 3.2.2
- 2) นำมาขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อให้ได้ความสูงที่ 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ
- 3) จากนั้นทำขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากการหาเงื่อนไขการทำขั้วไฟฟ้าจากข้อ 3.2.3



รูปที่ 3.7 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสูง 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร

3.2.5 การทดลองวัดไฟฟ้าเบื้องต้น

- 1) นำตัวอย่างวางบนเตาให้ความร้อน ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองดังรูป
- 2) บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อน ด้านเย็น กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส
- 3) นำข้อมูลไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้า และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์



รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดไฟฟ้าเบื้องต้น

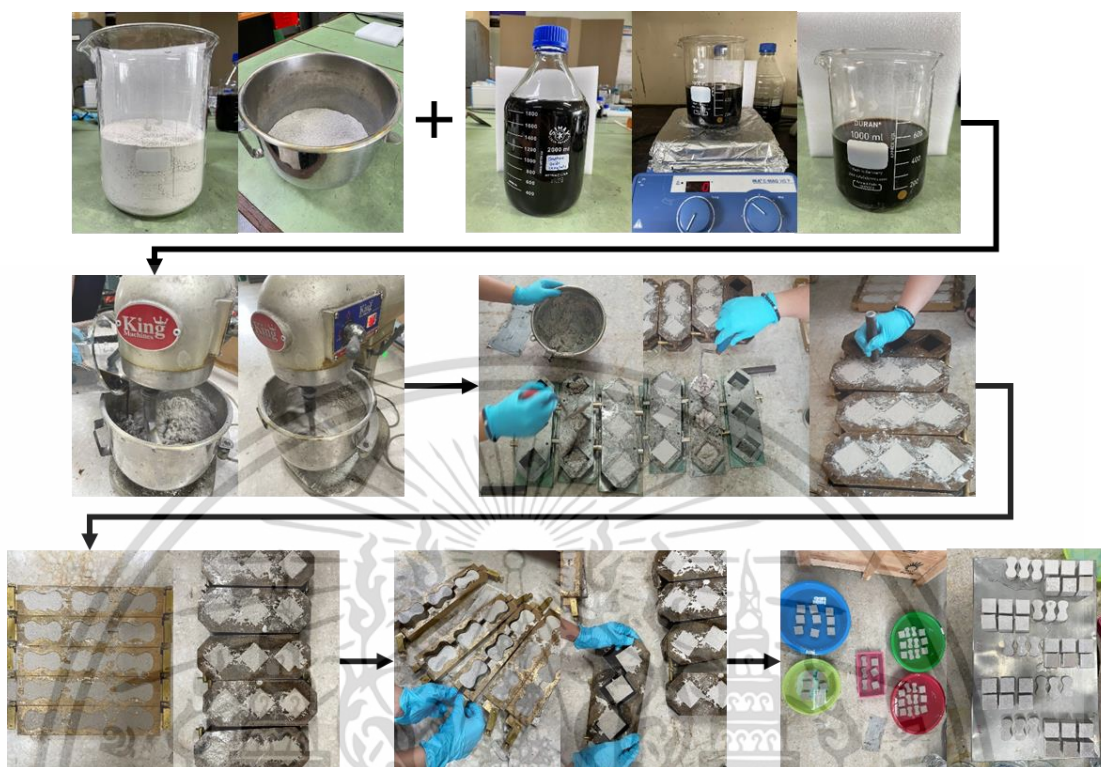
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบ

ก่อนอื่นผสมสารแขวนลอย GO ในน้ำ DI ด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก (ที่ 250 วัตต์และความถี่ 20 kHz) เป็นเวลา 20 นาทีโดยใช้ส่วนผสมตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 วิธีการปรับปรุงความแข็งแรงของ ซีเมนต์คือการกระจาย GO อย่างสม่ำเสมอซึ่งละลายได้ในน้ำและผสมกับซีเมนต์ ต่อจากนั้นเติมสารละลาย GO ลงในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (CAST 11 LW) ซึ่งเตรียมในอัตราส่วน 0.5 % โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมที่ความเร็ว 218 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้น GMT คอมโพสิต จากนั้นนำไปหล่อในแม่พิมพ์ขนาดลูกบาศก์ 50 มม. x 50 มม. x 50 มม. เพื่อตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและทดสอบสมบัติทางความร้อน และแม่พิมพ์ Briquette Mold เพื่อตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังแรงดึงโดยตรง ทำการกระทุ้งให้คอนกรีตแน่นและช่วยลดช่องว่างที่เกิดจากฟองอากาศ จากนั้นเก็บตัวอย่างทั้งหมดไว้ในแม่พิมพ์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง GMT₀, GMT_{0.01}, GMT_{0.03}, GMT_{0.05} และ GMT_{0.1} คอมโพสิต ถูกบ่มภายใต้ น้ำประปาเป็นเวลา 3, 7, 21, 28 และ 77 วันที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมและปริมาณการเตรียมตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนผสม		
	ปูนมอร์ตาร์ (g)	น้ำ (ml)	กราฟีนออกไซด์ (ความเข้มข้น 2 mg/ml)
GMT ₀	1100	550	0
GMT _{0.01}	1099.945	522.5	0.055 g (27.5 ml)
GMT _{0.03}	1099.835	467.5	0.165 g (82.5 ml)
GMT _{0.05}	1099.725	412.5	0.275 g (137.5 ml)
GMT _{0.1}	1099.450	275	0.550 g (275 ml)



รูปที่ 3.9 กระบวนการขึ้นรูปตัวอย่าง

3.2.7 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของคอนกรีต

โครงสร้างผลึกและคุณลักษณะของคอมโพสิต GMT ได้รับการตรวจสอบโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (SHIMADZU/Japan, XRD-6100) และ Raman spectroscopy โดยใช้เครื่อง Raman spectrometer (Thermo Fisher Scientific, DXR SmartRaman) สังเกตลักษณะพื้นผิวของ GMT โดยใช้ TEM และ SEM ทำการวิเคราะห์การสลายตัวของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis/differential thermal analysis (TG/DTA) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA, Perkin Elmer, Pyris 1)

3.2.8 การทดสอบคอนกรีต

3.2.8.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ โมเดล TTR-080G โดยนำตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 cm วางกึ่งกลางของแท่น กดตัวอย่างจนเกิดการวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติ กำลังรับแรงอัดสามารถคำนวณได้จากค่าน้ำหนักสูงสุดและพื้นที่หน้าตัด ดังสมการ

$$F = \frac{P}{A}$$

โดย F = กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)

P = น้ำหนักสูงสุด (kg)

A = พื้นที่หน้าตัด (cm^2)



รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.2.8.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Direct tensile โมเดล TTR-MUL125 โดยใช้ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยแบบหล่อบริควอท (Briquette Mold) ใช้อัตราการดึง 1mm/min ดึงให้เกิดการวิบัติ บันทึกน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบ Direct tensile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8.3 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

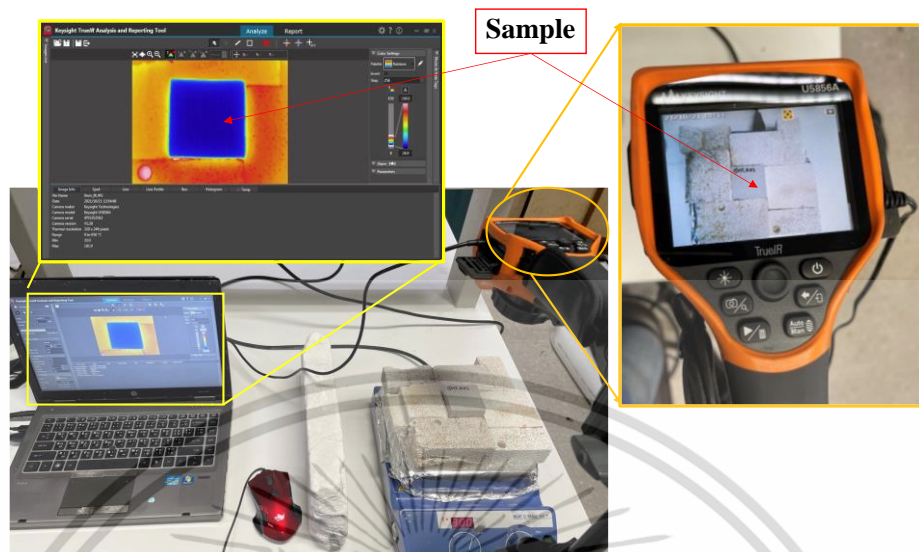
ค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลของความร้อนที่จุดใดๆ ผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ ถ้าวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดี จะมีค่า k ที่สูง จะเรียกว่าวัสดุประเภทนี้ว่า ตัวนำความร้อน แต่ถ้าวัสดุใดสามารถนำความร้อนได้น้อยหรือมีค่า k ต่ำ วัสดุประเภทนี้จะเรียกว่า ฉนวนความร้อน มีสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้ดี ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน ยี่ห้อ Applied precision รุ่น ISOMET 2114 ดังรูปที่ 3.12

พฤติกรรมการเป็นฉนวนความร้อนของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ที่อายุการบ่ม 7 วันได้รับการตรวจสอบ การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของคอมโพสิต GMT สังเกตได้ในเวลาทดลองเป็นเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้การถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 อุณหภูมิของพื้นผิวด้านร้อนคือ 350 °C

และได้ศึกษาผลต่างอุณหภูมิของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ที่อายุการบ่ม 7 โดยให้อุณหภูมิด้านร้อน เริ่มจากอุณหภูมิห้องถึง 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเควัดอุณหภูมิ พร้อมจับภาพการกระจายความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.12 การทดสอบการนำความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 3.13 การถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรดของตัวอย่าง



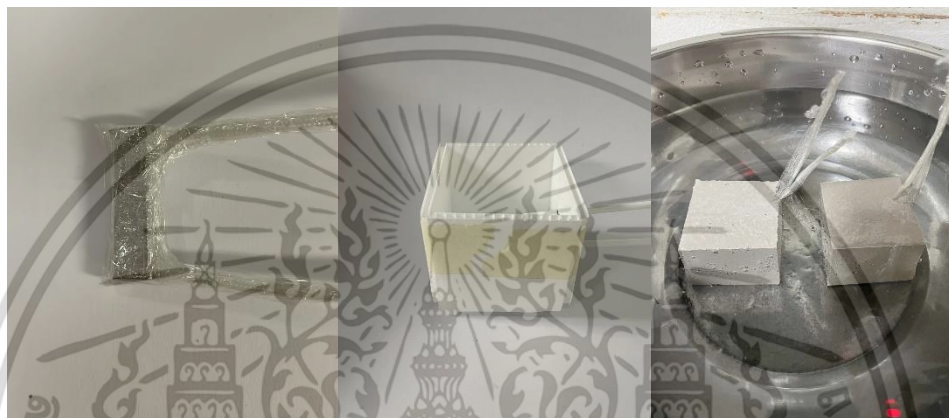
รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การศึกษาคircuitต่างอุณหภูมิ

3.2.9 การฝังแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตบล็อก

- 1) เตรียมแท่งเทอร์โมอิเล็กทริก 1 แท่งเซลล์ ที่ความสูง 2 เซนติเมตร จากการหาเงื่อนไขความสูงของแท่งเซลล์
- 2) นำมาต่อขั้วไฟฟ้า โดยใช้วิธีการต่อขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 จากข้อ 3.2.3
- 3) ทำการห่ออุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยพลาสติกแรปก่อนจะนำไปฝังในคอนกรีตบล็อก
- 4) เตรียมคอนกรีตตามเปอร์เซ็นต์สัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด จากทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติความร้อน
- 5) เตรียมแบบหล่อ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และเทคอนกรีตลงแม่แบบ 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

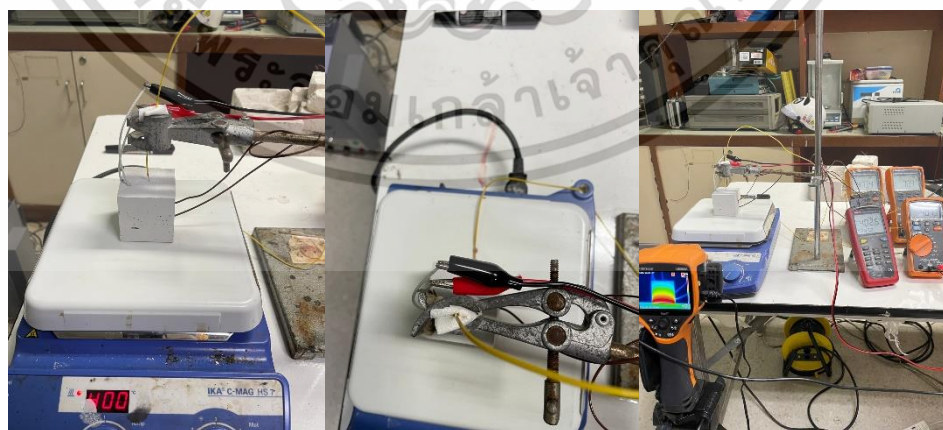
- 6) วางแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เตรียมไว้ลงในคอนกรีตหล่อ
- 7) เทคอนกรีตที่เหลือให้ได้ความสูง 5 เซนติเมตร
- 8) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 9) แกะแม่แบบ จากนั้นทำการบ่มในอายุบ่มที่เหมาะสม จากการทดสอบสมบัติเชิงกล
- 10) นำไปทดสอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 การเตรียมแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตบล็อก

3.2.10 การทดสอบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ มาให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมบันทึกอุณหภูมิภายใน และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 การทดสอบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.10 การทดสอบวัด I-V curve และ P-V curve

ให้ความร้อนพื้นผิวตัวอย่างด้านหนึ่งโดยให้อุณหภูมิภายในจากอุณหภูมิห้องถึง 200 องศาเซลเซียส ปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 Ω ที่อุณหภูมิด้านร้อนภายใน 80, 110, 170 และ 200 องศาเซลเซียส บันทึกค่าความต่างศักย์ กระแส อุณหภูมิภายในและภายนอกคอนกรีต



รูปที่ 3.17 การทดสอบวัด I-V curve และ P-V curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

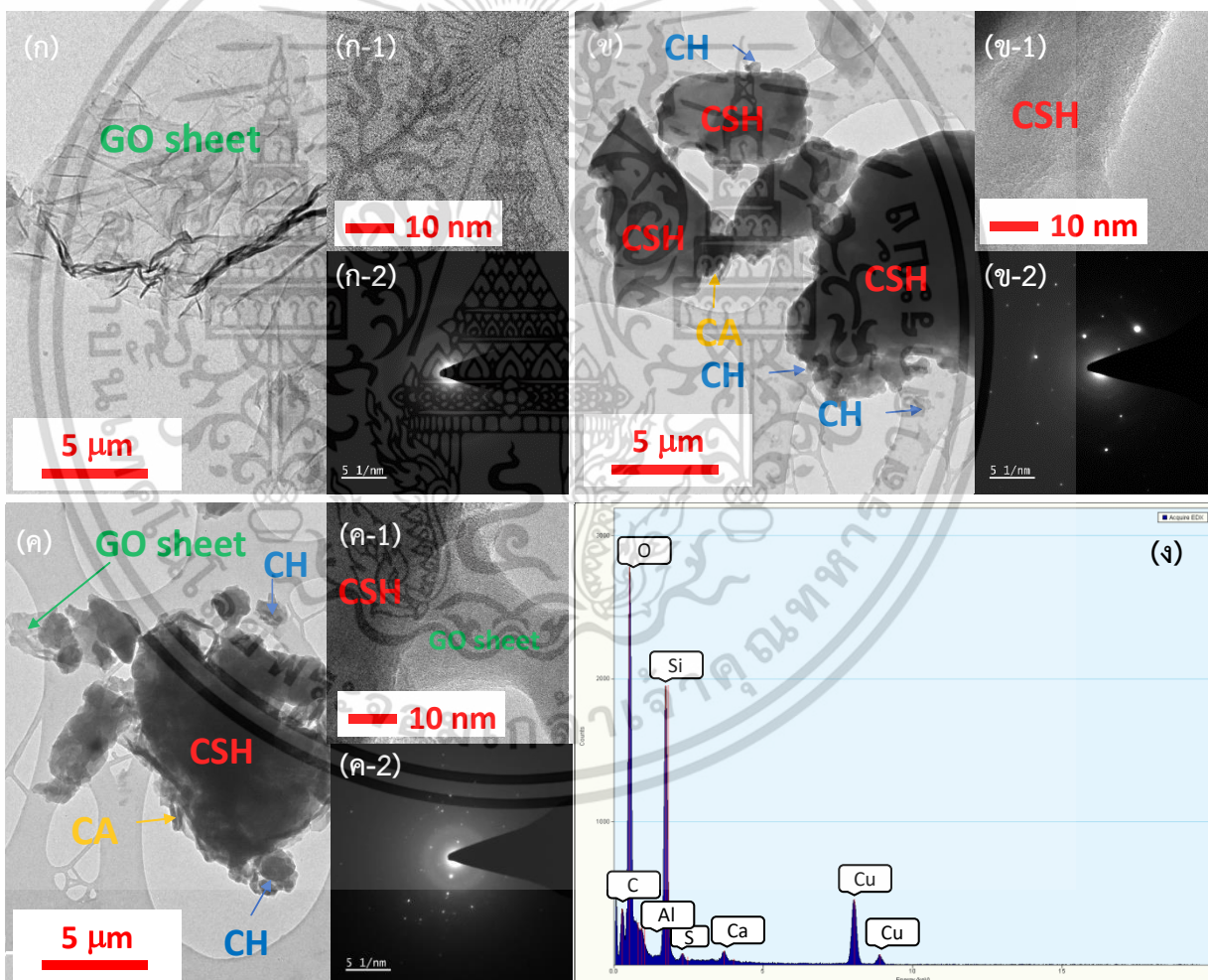
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การหาเงื่อนไขของคอนกรีตทนไฟ CAST 11 LW ผสมกราฟีนออกไซด์ เพื่อนำประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของคอนกรีต

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชันหรือ TEM (Transmission Electron Microscopy)

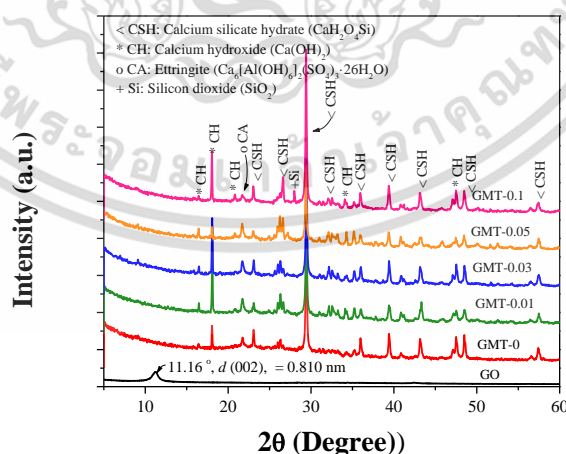


รูปที่ 4.1 ภาพ TEM, ภาพกำลังขยายสูงและรูปแบบ SAED ของ (ก) GO sheets, (ข) GMT₀, (ค) GMT_{0.05} และ (ง) สเปกตรัม Energy Dispersive X-ray (EDX) ของ GMT_{0.05}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของแผ่น GO, คอมโพสิต GMT_0 และ GMT_0.05 ถูกวิเคราะห์โดยภาพ TEM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) – (ง) รูปที่ 4.1 (ก) เผยให้เห็นการมีอยู่ของแผ่น GO ที่มีรูปร่างเหมือนแผ่นบางขนาดใหญ่ที่มีพื้นผิวโปร่งแสงและเป็นรอยพับดั่งที่เห็นในภาพแทรกของรูปที่ 4.1 (ก-1) นอกจากนี้ รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Selected Area Electron Diffraction /SAED) ในส่วนแทรกของรูปที่ 4.1 (ก-2) บ่งชี้ถึงวงแหวนการเลี้ยวเบนของรัศมี ซึ่งหมายถึงชั้นสัณฐานที่มีการวางแนวแบบสุ่มของโครงสร้างคริสตัลไลน์ [16] นอกจากนี้ ภาพ TEM ของคอมโพสิต GMT_0 และ GMT_0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) – (ค) เผยเศษส่วนของอนุภาคที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและเฟส CSH ขนาดไมโครเมตร ในปูนซีเมนต์ พบการเติบโตของเกรนที่ไม่สมบูรณ์เล็กน้อยของเฟส CH และ CA tube บนผิวของ CSH CA tube ปรากฏเป็นผลึกคล้ายแท่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา มีการเติบโตขนาดใหญ่มาอุดรูพรุนหรือรอยแตกในคอนกรีตหรือปูนมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว จะเห็นได้จากภาพกำลังขยายสูงของรูปที่ 4.1 (ค-1) ว่าพื้นผิวของเฟส CSH ถูกยึดโดยแผ่น GO ซึ่งเพิ่มความแน่นของทั้งซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่แข็งตัว รูปแบบ SAED ในส่วนแทรกของรูปที่ 4.1 (ข-2) แสดงจุดเลี้ยวเบนของตัวอย่าง GMT_0 ในขณะที่ GMT_0.05 แสดงวงแหวนการเลี้ยวเบนศูนย์กลางของจุดดั่งที่แสดงไว้ในภาพแทรกของรูปที่ 4.1 (ค-2) ซึ่งบ่งชี้ ลักษณะผลึกคริสตัลไลน์ [52] ผลลัพธ์นี้เป็นการยืนยันการมีอยู่ของแผ่น GO ที่ฝังอยู่ใน GMT_0.05 รูปที่ 4.1 (ง) ระบุสเปกตรัม EDX ของ GMT_0.05 ซึ่งมีองค์ประกอบ C, Al, Ca, Si และ O [52]

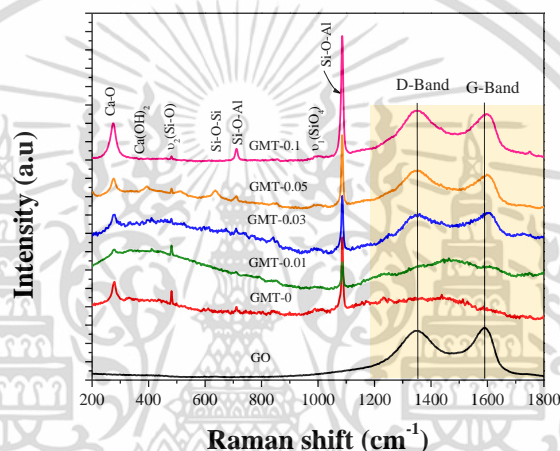
4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ XRD (X-Ray Diffraction)



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบ XRD ของแผ่น GO, GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 คอมโพสิตตามลำดับ

รูปแบบ XRD ของแผ่น GO แสดงพีคการเลี้ยวเบนปรากฏที่ 2Theta ที่ 11.16 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (002) ด้วยระยะห่าง d ที่ 0.810 นาโนเมตร [27] ถัดไป รูปแบบ XRD ของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 มีระนาบสอดคล้องกับเฟสของซีเมนต์ไฮเดรตประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaH}_2\text{O}_4\text{Si}$; CSH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; CH) และ Ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$; CA) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2 ; Si) [25] ผล XRD สามารถยืนยันว่าเป็นเฟสบริสุทธิ์ของซีเมนต์มอร์ตาร์

4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

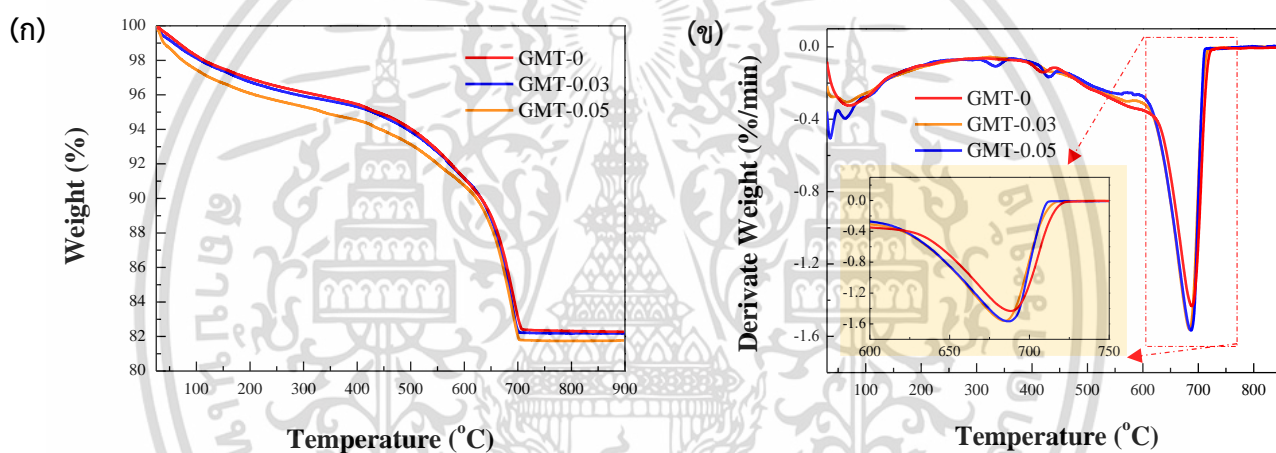


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมรามานของแผ่น GO, GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ

สเปกตรัมรามานของแผ่น GO, GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05, and GMT_0.1 แสดงดังรูป 4.3 โดยทั่วไปสเปกตรัมรามานของแผ่น GO แสดง 2 พีคหลัก ที่ $\sim 1338 \text{ cm}^{-1}$ และ $\sim 1586 \text{ cm}^{-1}$ เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็น D bands และ G bands ในโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนตามลำดับ [27,53] นอกจากนี้ G-band ยังสัมพันธ์กับการสั่นไฮบริดเซชันแบบ sp^2 ของอะตอมคาร์บอนในโครงตาข่ายหกเหลี่ยม 2 มิติ [27,53] สเปกตรัมรามานของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05, และ GMT_0.1 พบว่าเป็นมอร์ตาร์บริสุทธิ์ [54] แถบที่ $\sim 714 \text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดโดยการสั่นแบบยืดไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ Si-O-Al และแถบที่ $1,088 \text{ cm}^{-1}$ อาจเป็นเพราะแลตทิซโหมด ถัดไปแถบที่ $\sim 953 \text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดให้กับ $\text{U1}(\text{SiO}_4)$ การสั่นแบบยืดที่สมมาตร (symmetric stretching) ของเฟส CHS ซึ่งเป็นเฟสหลักที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

[54] แถบที่ $\sim 670\text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดโดยการสั่นแบบยืดไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ Si-O-Si แถบที่ $\sim 483\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบสมมาตร (symmetric stretching) $\text{U}_2(\text{Si-O})$ และแถบเล็กที่ $\sim 365\text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดให้เป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [53,54] แถบที่ $\sim 299\text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดให้กับการเปลี่ยนรูปของโครงข่ายซิลิเกตพร้อมกับการสั่นแบบยืด Ca-O [27,53] ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าตัวอย่างทั้งหมดเป็นเฟสบริสุทธิ์ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ความเข้มข้นของคอมโพสิตสูง ($> \text{GMT}_{0.03}$) เห็นได้ชัดว่าทั้งสองพีคนั้นสังเกตได้จากอิทธิพลของคอมโพสิต GO ซึ่งเพิ่มความแน่นของทั้งซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว

4.1.1.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis/differential thermal analysis (TG/DTA)

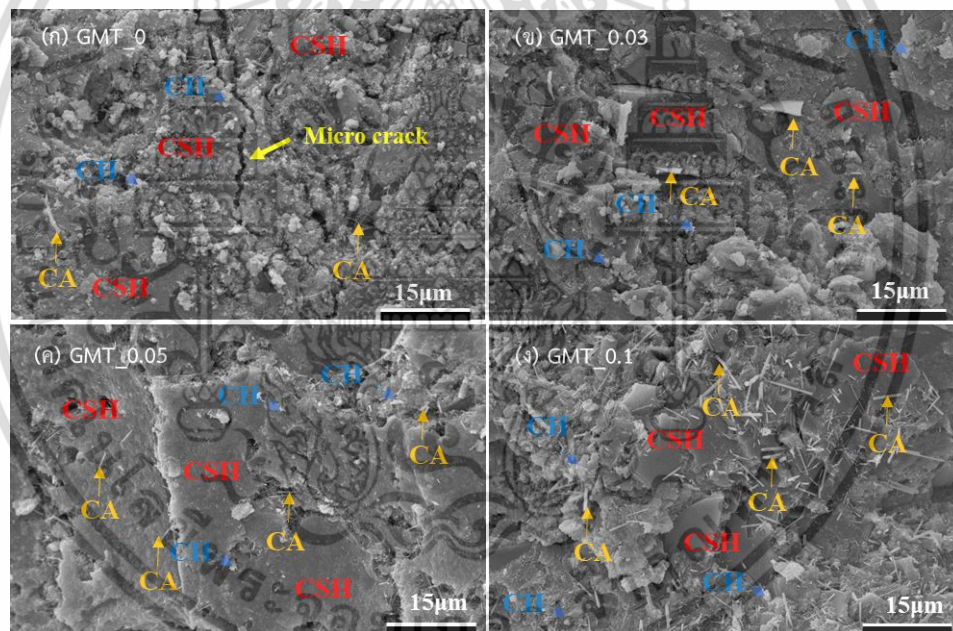


รูปที่ 4.4 (ก) TGA curves และ (ข) DTG curves ของ GMT_0, GMT_0.03, GMT_0.05 ตามลำดับ

ข้อมูล TGA แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4 น้ำหนักที่ลดลงและพีค DTG ของคอมโพสิต GMT ค่อยๆ ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้บ่งชี้เฟสจำเพาะของการสลายตัวของสารประกอบ สังเกตได้ว่าการสลายตัวสามขั้นตอนในตัวอย่างทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่ำ $\sim 30\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ การสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงประมาณ 4% ควรจะเกี่ยวกับการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับ [55] ที่อุณหภูมิประมาณ 100-500 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ลดลงควรเป็นการสลายตัวของ CSH ซึ่งเป็น mono-carbonate นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิสูง 600-750 $^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักที่ลดลงอย่างมากเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของการเผาเป็น CO_2 [55] ที่น่าสนใจคือพีค DTG ของคอมโพสิต GMT ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ GO เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของ GO สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนในคอมโพสิตมอร์ตาร์

4.1.1.5 ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตแสดงลักษณะเฉพาะด้วยภาพ SEM อย่างไรก็ดีตาม ไม่พบแผ่น GO เนื่องจากแผ่นมีขนาดเล็ก พื้นผิวของอนุภาคปูนมอร์ตาร์ถูกรวบรวมโดยแผ่น GO ตามรูปที่ 4.5 (ก) – (ง) รูปภาพ SEM ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 และปริมาณของ CH, CA และ CSH ที่เป็นปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไป เห็นได้ชัดว่า GO มีผลต่อขนาดซีเมนต์มอร์ตาร์คือสามารถปรับปรุงความแน่นขนาดเล็ก (micro compactness) รอยแตกขนาดเล็ก (micro cracks) และเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำ [56] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นการเพิ่ม GO ลงในวัสดุคอมโพสิต GMT ที่มีปริมาณน้อยสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้เนื่องจากแผ่น GO มีบทบาทเป็นสะพานผ่านพันธะโควาเลนต์กับ CSH [26]

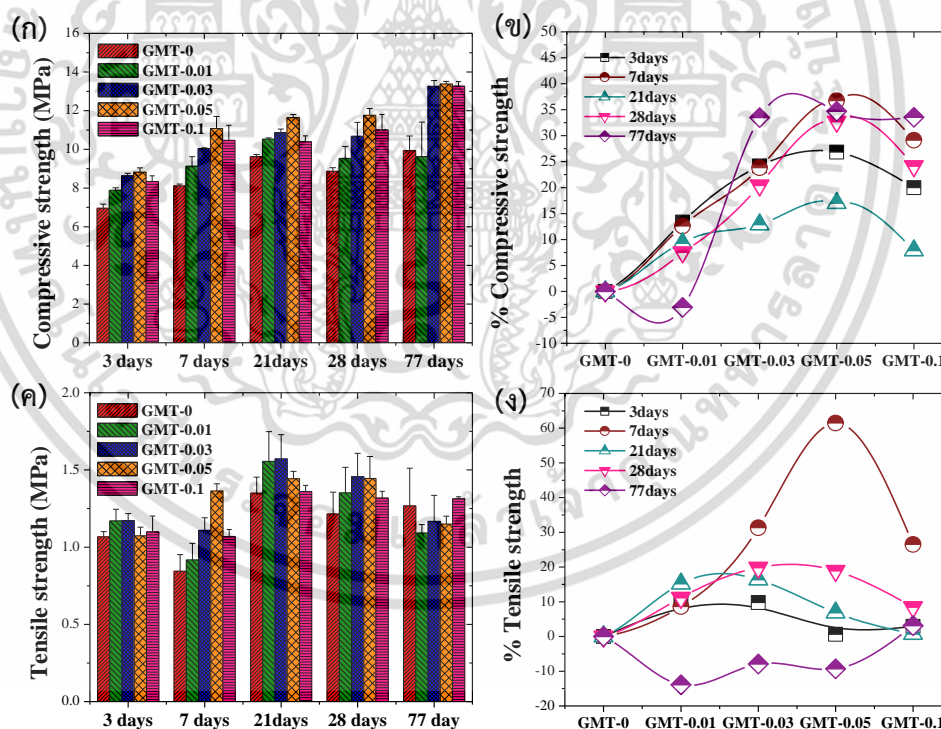


รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1

Name	Oven dry density (kg/m ³)	Saturated water density (kg/m ³)	Porosity (%)
GMT_0	0.944 ± 0.008	1.252 ± 0.044	32.63
GMT_0.01	1.012 ± 0.020	1.336 ± 0.056	32.02
GMT_0.03	1.040 ± 0.032	1.336 ± 0.104	28.46
GMT_0.05	1.056 ± 0.024	1.340 ± 0.076	26.89
GMT_0.1	1.060 ± 0.036	1.280 ± 0.040	20.75

4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกล



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบของ (ก) กำลังรับแรงอัด และ (ข) % กำลังรับแรงอัด (ค) ค่าความต้านทานแรงดึง และ (ง) % ค่าความต้านทานแรงดึง ที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วันของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 คอมโพสิตตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

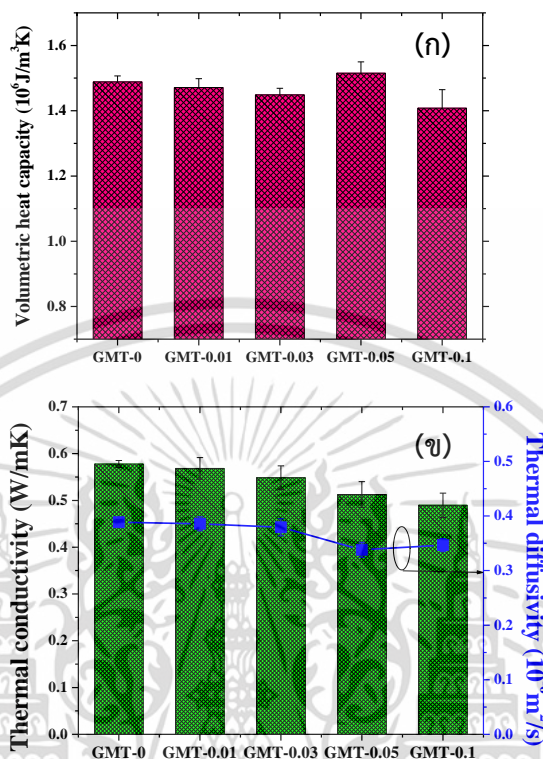
รูปที่ 4.6 (ก) แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วัน สำหรับคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของวัสดุคอมโพสิต GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 มีค่ามากกว่าตัวอย่าง GMT_0 (ไม่มีการคอมโพสิต GO) สำหรับอายุการบ่มที่ 3, 7, 21, 28 และ 77 วันตามลำดับ ตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมของคอมโพสิต GMT เมื่อเปรียบเทียบกับ GMT_0 อธิบายโดยกลุ่มฟังก์ชันจำนวนมากใน GO เช่น กรดคาร์บอกซิลิก carboxylic acid ที่ทำปฏิกิริยากับ CSH, CH และ CA ในปูนมอร์ตาร์ ควรเกิดพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง [57] อายุการบ่มที่ 7 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุดที่ 11.084 ± 0.620 MPa เมื่อปริมาณ GO เท่ากับ 0.05 % โดยน้ำหนัก (GMT_0.05) ซึ่งสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ GMT_0 ประมาณ 36.71 % ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) Namsone et al. [24] รายงานว่ากำลังรับแรงอัด 28 วันอยู่ที่ 6.68-12.49 MPa สำหรับเมทริกซ์โพลีเมอร์โดยใช้ expanded glass aggregates ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ นอกจากนี้ Rafiee et al. [58] รายงานว่ากำลังอัดของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นประมาณ 15% เมื่อเทียบกับปูนมอร์ตาร์ธรรมดาเมื่อความเข้มข้น GO เท่ากับ 1.0 wt% เนื่องจาก GO เสริมกำลังในกับรอยแยกในซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้น GO สูง > 0.05 wt% กำลังอัดจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการสะสมตัวของแผ่น GO นอกจากนี้เมื่ออายุการบ่มสูงกว่า 7 วัน เปอร์เซ็นต์กำลังอัดมีค่าต่ำประมาณ 26.83, 17.00, 32.71 และ 34.70% สำหรับอายุการบ่มที่ 3, 21, 28 และ 77 วันตามลำดับ วัดโดยตัวอย่าง GMT_0.05 รูปที่ 4.6 (ค) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วันเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของ GO ต่อความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่าง GMT_0.05 แสดงให้เห็นว่าสูงสุดโดยสูงถึง 61.45 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) ดังที่ Qian et al. [59] รายงานว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตซีเมนต์ที่มีความเข้มข้น GO ต่ำ 0.05 % โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นถึง 18.7% และ 13.7% ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วันตามลำดับ ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างทั้งหมดสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ในการทดสอบแรงอัดและแรงดึงความแข็งแรงของคอมโพสิต GMT เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติม GO ซึ่งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาไฮเดรชันลดปริมาตรของรูพรุน แรงการก่อดตัวของผลึก และทำให้ผลึกเรียงตัวกัน จะเพิ่มความหนาแน่นของทั้งซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่แข็งตัว [60] นอกจากนี้ สมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ยังได้รับการปรับปรุงโดยวัสดุคอมโพสิต GO

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดและความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 21, 28 และ 77 วันตามลำดับ

การทดสอบ สมบัติเชิงกล	อายุการ บ่ม (วัน)	ตัวอย่าง				
		GMT_0	GMT_0.01	GMT_0.03	GMT_0.05	GMT_0.1
ค่าความ ต้านทานกด (MPa)	3	6.954±	7.882±	8.635±	8.819±	8.344±
		0.212	0.127	0.122	0.225	0.292
	7	8.107±	9.126±	10.037±	11.084±	10.467±
		0.097	0.496	0.044	0.620	0.780
	21	9.631±	10.524±	10.871±	11.641±	10.389±
		0.099	0.070	0.178	0.157	0.311
	28	8.864±	9.533±	10.676±	11.763±	11.004±
		0.191	0.618	0.721	0.352	0.802
	77	9.936±	9.631±	13.262±	13.282±	13.268±
		0.756	1.776	0.299	0.132	0.235
ค่าความ ต้านทานแรงดึง (MPa)	3	1.067±	1.169±	1.171±	1.073±	1.098±
		0.033	0.075	0.045	0.056	0.103
	7	0.844±	0.916±	1.108±	1.363±	1.068±
		0.107	0.107	0.081	0.046	0.046
	21	1.349±	1.55±	1.571±	1.442±	1.359±
		0.103	0.192	0.157	0.047	0.040
	28	1.215±	1.351±	1.456±	1.445±	1.318±
		0.141	0.166	0.152	0.142	0.043
	77	1.267±	1.091±	1.166±	0.149±	1.312±
		0.244	0.055	0.168	0.051	0.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 4.7 (ก) ความจุความร้อนเชิงปริมาตร (C_v) และ (ข) ค่าการนำความร้อน (K) และการกระจายความร้อน ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับเมื่ออายุ บ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.7 (ก) – (ข) แสดงความจุความร้อนเชิงปริมาตร (C_v), การนำความร้อน (K) และการกระจายความร้อนของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 คอมโพสิต ตามลำดับที่อายุบ่ม 7 วัน ในรูปที่ 4.7 (ก) ค่าความจุความร้อนเชิงปริมาตรเท่ากับ 1.489×10^6 , 1.471×10^6 , 1.449×10^6 , 1.515×10^6 และ $1.408 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ สำหรับคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า GMT_0.05 มีค่า C_v ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ นอกจากนี้ ค่าการนำความร้อนและการกระจายความร้อนยังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 (ข) พบว่าค่าการนำความร้อนคือ 0.578 ± 0.008 , 0.568 ± 0.023 , 0.549 ± 0.025 , 0.513 ± 0.028 และ $0.490 \pm 0.026 \text{ W/mK}$ สำหรับ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าการกระจายความร้อนอยู่ในช่วง 0.38×10^{-6} ถึง $0.33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ค่าการนำ

ความร้อนจะลดลงตามปริมาณ GO ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการนำความร้อนต่ำหรือฉนวนที่ดีเยี่ยมของแผ่น GO และปฏิกิริยาที่สัระหว่าง CSH, CH และ CA ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์และแผ่น GO ค่าการนำความร้อนต่ำพบที่ 0.05 % โดยน้ำหนัก (GMT_0.05) และ 0.1 % โดยน้ำหนัก (GMT_0.1) คล้ายกับที่สังเกตได้ในคุณสมบัติของฉนวนความร้อนต่ำของคอมโพสิต GMT โดยทั่วไป วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า 0.250 W/m K เรียกว่าวัสดุฉนวนความร้อน [61] ดังนั้นฉนวนความร้อนของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จึงได้รับการปรับปรุงโดยคอมโพสิต GO

พฤติกรรมการเป็นฉนวนความร้อนของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ที่อายุการบ่ม 7 วันได้รับการตรวจสอบ การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของคอมโพสิต GMT สังเกตได้ในเวลาทดลองเป็นเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้การถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรด อุณหภูมิของพื้นผิวด้านร้อนคือ 350 °C ตามรูปที่ 4.8 อุณหภูมิทั้งสองด้านของอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำสำหรับคอมโพสิต GMT ทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนกว่าอุณหภูมิจะคงที่ ผลการศึกษาพบว่าคอมโพสิต GMT ทั้งหมดมีความเสถียรของอุณหภูมิต่ำให้ความร้อนในเวลาเดียวกันประมาณ 30 นาที พฤติกรรมการเป็นฉนวนความร้อนของปูนมอร์ตาร์มีความคล้ายคลึงกับสิ่งที่รายงานในการศึกษาอื่นโดย Yousefi et al. [62] ในคอมโพสิต GMT ทั้งหมด มีการสังเกตการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (อุณหภูมิต่ำ) เช่นเดียวกับมอร์ตาร์บริสุทธิ์ (GMT_0) ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของพื้นผิวมีความสำคัญเป็นพิเศษ เนื่องจากวัสดุสามารถปิดกั้นการถ่ายเทความร้อนได้ ควรใช้เป็นวัสดุฉนวนระหว่างพื้นผิวด้านร้อนและเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก วัสดุฉนวนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเอาต์พุตในอุปกรณ์แปลงพลังงาน เช่น อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ตัวอย่างเช่น Lv et al. [63] รายงานว่าประสิทธิภาพเอาต์พุตของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามการลดลงของคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่เติมในที่ว่างระหว่างขาเทอร์โมอิเล็กทริก นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเอาต์พุตของสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกลดลงประมาณ 1% เนื่องจากไม่ได้เติมวัสดุฉนวนความร้อนเข้าไปในที่ว่างระหว่างขาเทอร์โมอิเล็กทริกตาม Li et al. [64] ดังนั้นวัสดุฉนวนความร้อนควรเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเอาต์พุตของคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงหรือการจัดการถ่ายเทความร้อน [63,64] ΔT ของคอมโพสิต GMT สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 และพบว่าอยู่ในช่วง 276 – 279 °C และ 269 – 271 °C ที่เวลา 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ที่น่าสนใจสำหรับคอมโพสิต GMT_0.05 และ 0.1 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าการนำความร้อนต่ำของแผ่น GO เมื่อเทียบกับ rGO หรือ Graphene [65] นอกจากนี้ปฏิกิริยากับเฟส CSH และ CH ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บนพื้นผิว GO ควรเพิ่มคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอมโพสิต GMT

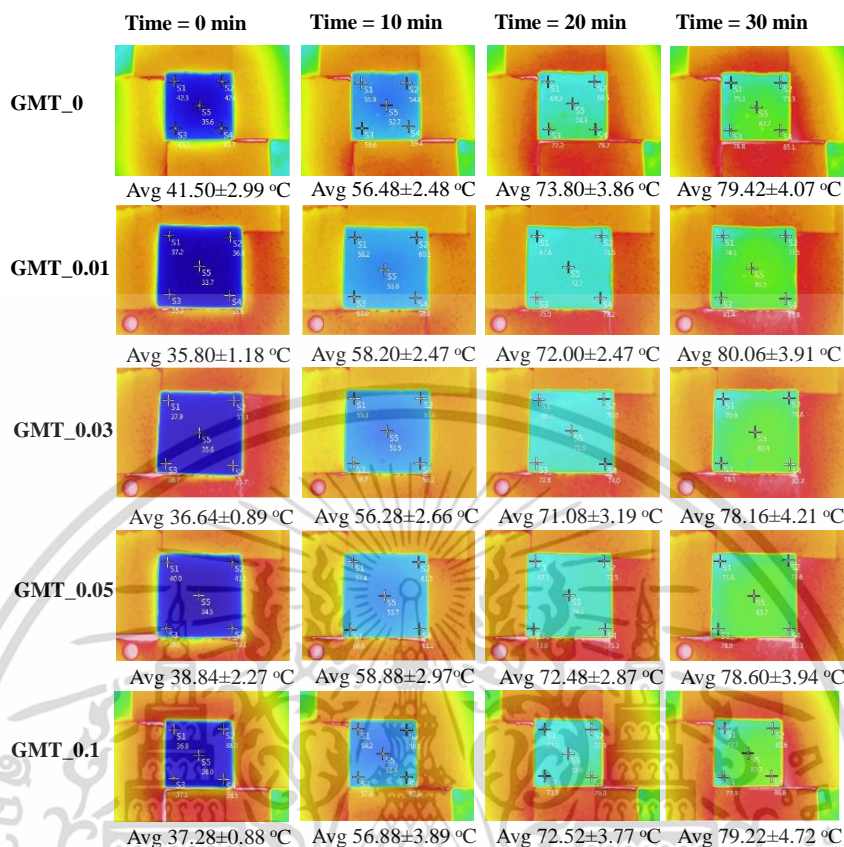
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อน (R) ซึ่งเป็นความต้านทานต่อการไหลของความร้อนในฐานะ
 ผนวความร้อนของวัสดุคอมโพสิต GMT ถูกกำหนดโดย $R = t/K$ โดยที่ t คือความหนาของฉนวนและ K
 คือค่าการนำความร้อนของตัวอย่าง [65] ค่าความต้านทานความร้อนของคอมโพสิต GMT ในพื้นที่ 5×5
 cm^2 และความหนา 5 cm สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานความร้อนเท่ากับ 0.087, 0.115,
 0.091, 0.098 และ 0.102 $\text{m}^2 \text{K/W}$ สำหรับตัวอย่างคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03,
 GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ตัวอย่างของคอมโพสิต GMT_0.05 และ GMT_0.1 แสดงค่าความ
 ต้านทานความร้อนสูง ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าตัวอย่างเหล่านั้นให้ค่าความต้านทานความร้อนสูง

การตรวจสอบพื้นผิวโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (U) เนื่องจากการผกผันของ
 ค่าความต้านทานความร้อนได้กระทำผ่าน $U = 1/R$ [61,65] ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมคือ
 11.556, 11.369, 10.972, 10.252 และ 9.792 $\text{W/m}^2\text{K}$ สำหรับตัวอย่างของคอมโพสิต GMT_0,
 GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) คำนวณโดย $Q = KA(\Delta T/t)$ โดยที่ K คือค่าการนำความ
 ร้อนของตัวอย่าง t คือความหนาของฉนวน ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ และ A คือพื้นที่ของ
 ตัวอย่าง Q ของคอมโพสิต GMT ที่ด้านเย็นเวลา 20 และ 30 นาที ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเท
 ความร้อนลดลงเมื่อมีปริมาณ GO เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าGO
 nanosheet ที่เชื่อมต่อกับ CSH, CH และ CA ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ส่งผลต่อคุณสมบัติของผนวความร้อน
 ของคอมโพสิต GMT [61] อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำของคอมโพสิต GMT_0.05 และ GMT_0.1
 สำหรับเวลา 30 นาทีคือ 0.465 และ 0.443 W/นาที่ ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่คอม
 โปสิต GO (GMT_0)

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลต่างอุณหภูมิของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03,
 GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 โดยจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ GO ส่งผลต่อ
 ผลต่างอุณหภูมิ เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง



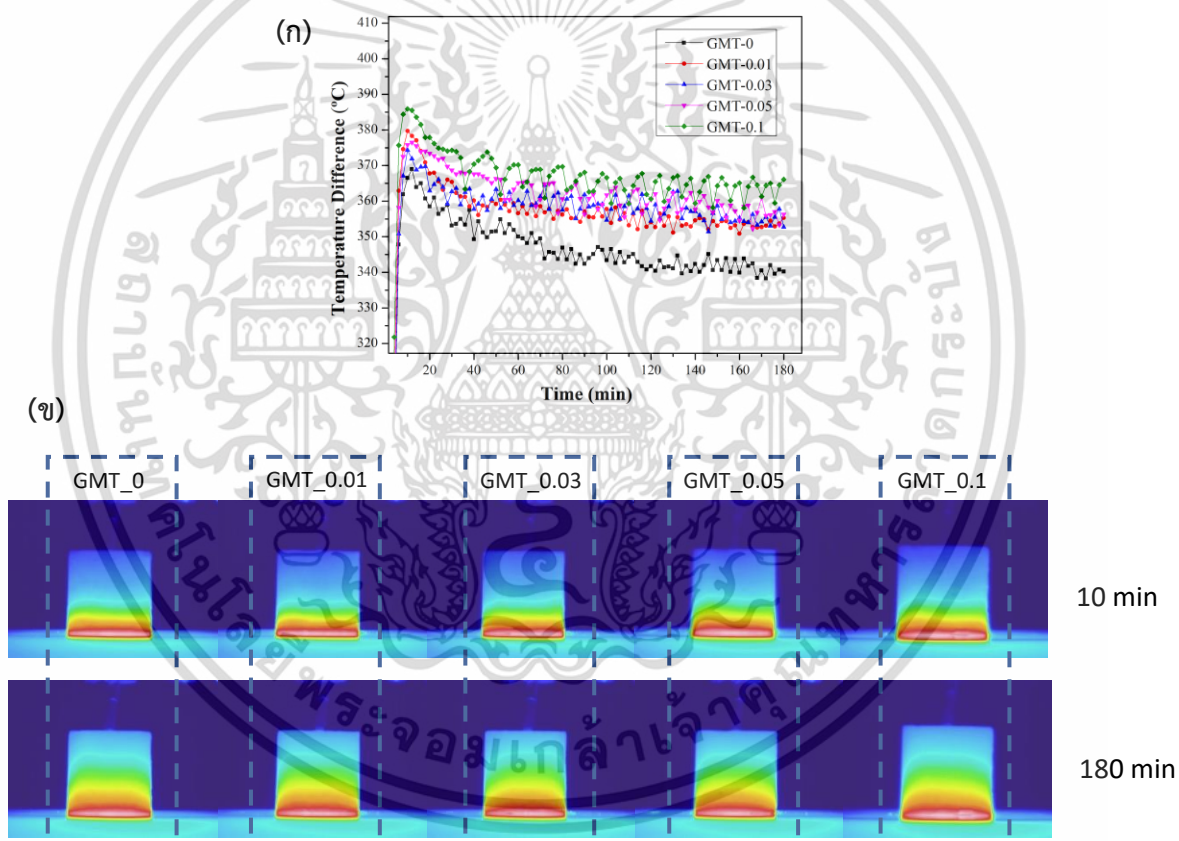
รูปที่ 4.8 ภาพความร้อนอินฟราเรดของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วันเป็นเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที

ตารางที่ 4.3 ค่าการนำความร้อน (K) ความต้านทานความร้อน (R) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (U) ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) ของ GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และคอมโพสิต GMT_0.1

ตัวอย่าง	ค่าการนำความร้อน (W/mK)	ความต้านทานความร้อน (m^2K/W)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (W/m^2K)	ความต่างอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)		อัตราการถ่ายเทความร้อน (W/min)	
				20 นาที	30 นาที	20 นาที	30 นาที
GMT_0	0.577 ± 0.007	0.087	11.556	276.20	270.58	0.793	0.523

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GMT_0.01	0.568 ± 0.022	0.088	11.369	278.00	269.94	0.783	0.514
GMT_0.03	0.548 ± 0.025	0.091	10.972	278.92	271.84	0.757	0.498
GMT_0.05	0.512 ± 0.027	0.098	10.252	277.52	271.40	0.705	0.465
GMT_0.1	0.489 ± 0.025	0.102	9.792	277.48	270.78	0.674	0.443

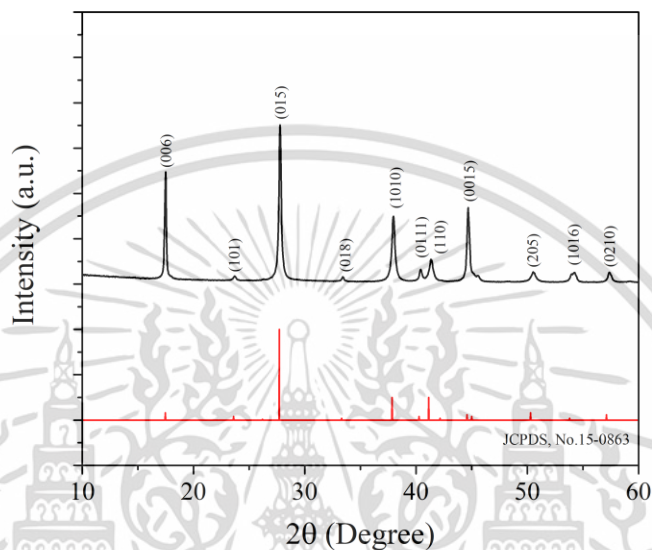


รูปที่ 4.9 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างอุณหภูมิและ (ข) ภาพการแพร่ความร้อน ของคอมโพสิต GMT_0, GMT_0.01, GMT_0.03, GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) ชนิดแท่งอินกอต เพื่อนำประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

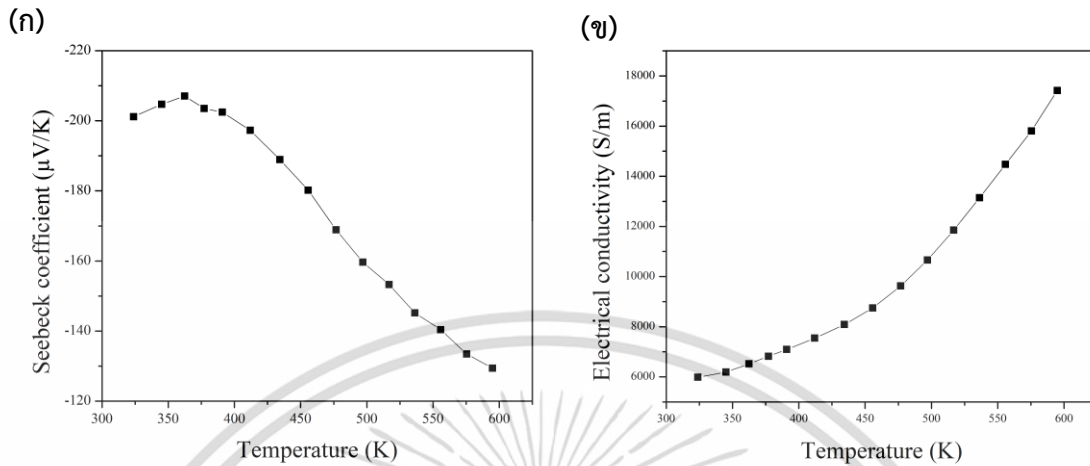
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ XRD (X-Ray Diffraction)



รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบ XRD ของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) ชนิดแท่งอินกอต

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) แสดงให้เห็นว่าระนาบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วยระนาบ (006), (101), (015), (018), (1010), (0111), (110), (0015), (205), (1016) และ (0210) ซึ่งสอดคล้องกับพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ คือ 17.45, 23.6, 27.61, 27.66, 33.29, 37.83, 41.15, 44.58, 50.32, 53.82 และ 57.13 องศาตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 โดยมีโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombohedral) ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 15-0863 ยืนยันว่าเป็นเฟสของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3)

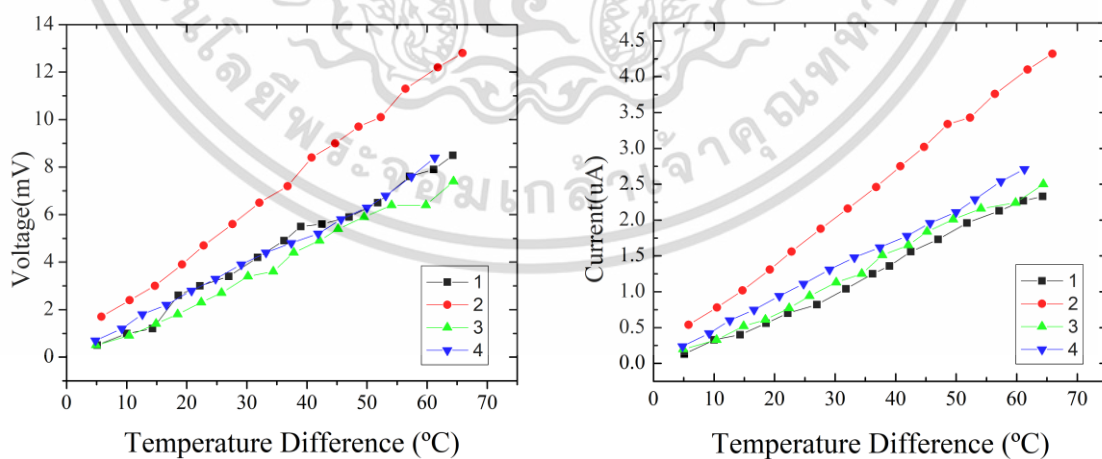
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 4.11 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและ (ข) สภาพการนำไฟฟ้าของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) ชนิดแท่งอินกอต

จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงการเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น และให้ค่าสูงสุด $-207.0583 \mu\text{V/K}$ ที่อุณหภูมิประมาณ 360 K สภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6000-18000 S/m ช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-600 K ซึ่งสภาพการนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.11

4.2.3 ผลการศึกษาการทำชั่วไฟฟ้าแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

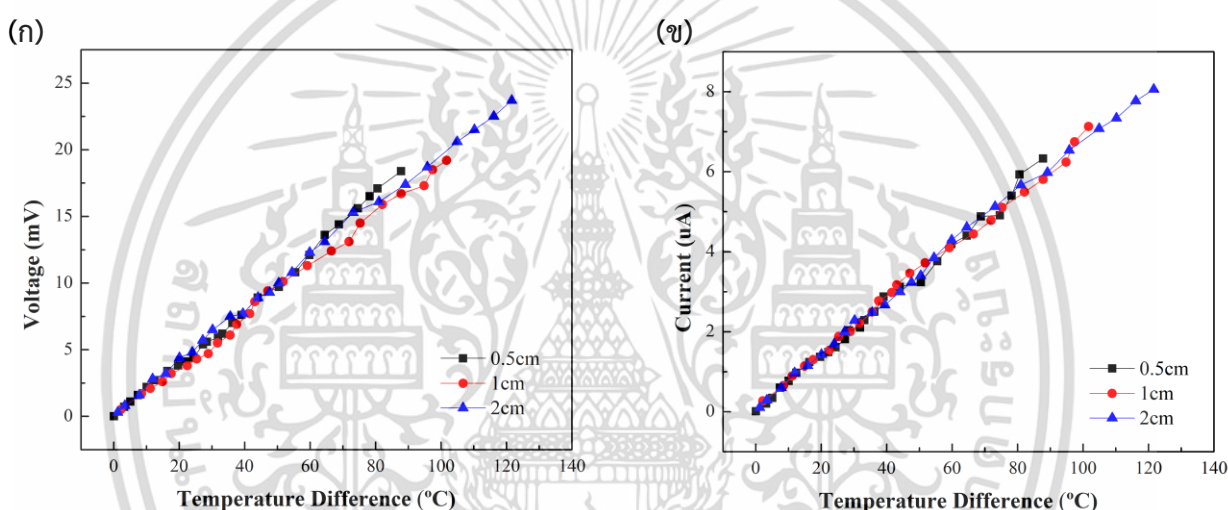


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ากับผลต่างอุณหภูมิของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่การทำชั่วไฟฟ้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาการทำซ้ำไฟฟ้าแห่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยให้ความร้อนที่ด้านหนึ่งของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก จากอุณหภูมิห้องจนถึง 100 °C และเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแต่ละเงื่อนไข ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 4.11 พบเห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การทำซ้ำไฟฟ้าแบบเงื่อนไขที่ 2 ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ~13 mV และกระแสไฟฟ้า ~4 μ A ที่ความต่างอุณหภูมิ ~66 °C ซึ่งมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการบัดกรีระหว่างแผ่นทองแดงสายไฟและแท่งเซลล์ทำให้ซ้ำติดที่แท่งเซลล์อย่างแน่นหนาและสนิททั่วทั้งซ้ำแท่งเซลล์ ซึ่งส่งผลต่อการนำไฟฟ้า

4.2.4 ผลการศึกษาความสูงของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

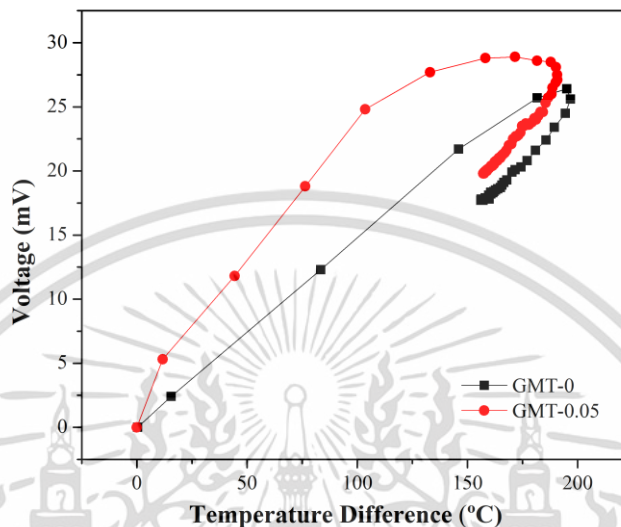


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และผลต่างอุณหภูมิของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความสูง 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร

จากการศึกษาความสูงของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยให้ความร้อนที่ด้านหนึ่งของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก จากอุณหภูมิห้องจนถึง 200 °C เปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแต่ละเงื่อนไข ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าความสูงแท่งเซลล์ที่ 2 เซนติเมตร ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ ~43 mV และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ ~8 μ A ที่ความต่างอุณหภูมิ ~120 °C เมื่อความสูงของแท่งเซลล์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิของแท่งเซลล์มากขึ้น

4.3 การศึกษาคอนกรีตอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

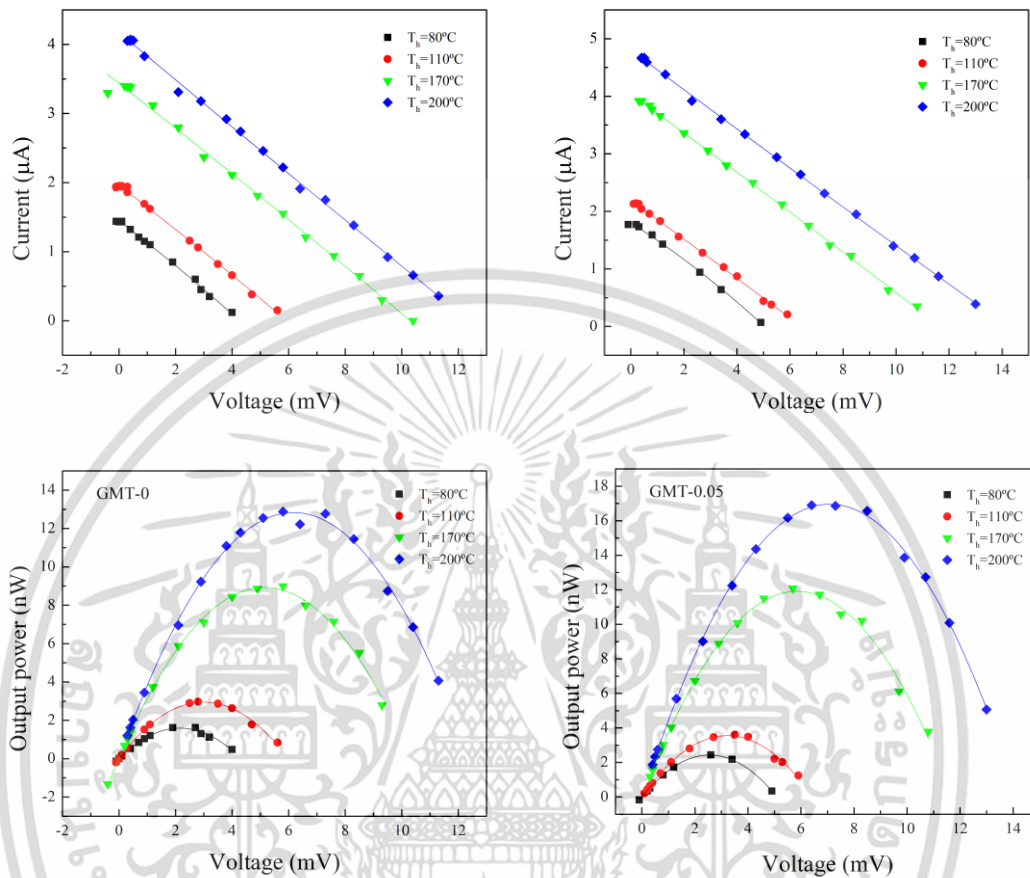
4.3.1 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และผลต่างอุณหภูมิของ GMT_0 และ GMT_0.05

จากการทดลองโดยการให้ความร้อนด้านหนึ่งจากอุณหภูมิห้องจนถึง 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำค่าอุณหภูมิภายในมาวิเคราะห์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ 2 จุดขั้วไฟฟ้าของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก จะเห็นว่า GMT_0.05 ให้ความต่างศักย์มากกว่า GMT_0 เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า ส่งผลต่อการเกิดความต่างอุณหภูมิของแท่งเทอร์โมอิเล็กทริกภายในคอนกรีต และเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิภายนอกด้านร้อนเสถียร ความต่างอุณหภูมิของแท่งเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มลดลง ส่งผลให้ความต่างศักย์ลดลง การป้องกันการแพร่ความร้อนระหว่าง 2 ด้านของแท่งเซลล์จึงสำคัญต่อเทอร์โมอิเล็กทริก

4.3.2 ผลการวัด I-V curve และ P-V curve



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V curve) และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V curve) ของแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีต GMT_0 และ GMT_0.05 ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษา I-V curve และ P-V curve ของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นโหลดเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิด้านร้อนที่ 80, 110, 170 และ 200 °C ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความต้านทานกระแสจะลดลงและแรงดันจะสูงขึ้น ส่งผลให้ทราบถึงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดที่สามารถผลิตได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตาม ที่อุณหภูมิเดียวกันแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตผสมกราไฟท์ออกไซด์ 0.05% โดยน้ำหนักของปูนมอร์ตาร์ (GMT_0.05) ให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลของปริมาณการเติมแผ่น GO ต่อคุณสมบัติทางกลและความร้อนของคอมโพสิตมอร์ตาร์ได้รับการตรวจสอบเฟสผลึก $\text{CaH}_2\text{O}_4\text{Si}$; CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; CH, $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$; CA และ SiO_2 ถูกสังเกตพบในทุกเงื่อนไข ซึ่งบ่งชี้ถึงวัสดุของปูนมอร์ตาร์ ขนาดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมบนพื้นผิวของ GO จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ GO ปูนมอร์ตาร์อนุภาคขนาดเล็กที่สร้างเฟส CSH, CH และ CA บนพื้นผิวของ GO ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ส่งผลต่อการเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึง ที่น่าสนใจคือค่าการนำความร้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ GO โดยค่าการนำความร้อนที่ 0.513 ± 0.028 และ 0.490 ± 0.026 W/mK สำหรับคอมโพสิต GMT_0.05 และ GMT_0.1 ตามลำดับ ระบุถึงวัสดุฉนวนความร้อน นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำของคอมโพสิต GMT_0.05 เป็นเวลา 30 นาทีคือ 0.465 W/min ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางใหม่ในการปรับปรุงฉนวนความร้อนของคอมโพสิตมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ ปฏิกริยาระหว่างเฟส CSH, CH และ CA ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์และแผ่น GO อาจส่งผลต่อฉนวนความร้อนของคอมโพสิต GMT ดังนั้นคุณสมบัติทางกลและความร้อนของวัสดุนาโนคอมโพสิตมอร์ตาร์จึงได้รับการปรับปรุงโดย GO nanosheets เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากโดดเด่นทั้งสมบัติทางกลและการเป็นฉนวนความร้อนที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อได้เปรียบเทียบกับแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีตผสมกราฟีนออกไซด์ 0.05% โดยน้ำหนักของปูนมอร์ตาร์ (GMT_0.05) และแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในคอนกรีต (GMT_0) ทำให้ทราบว่าแท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกใน GMT_0.05 ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตะกั่วที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าที่แท่งเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกมีจุดหลอมเหลวที่ 327.5 °C ซึ่งหากไม่มีวัสดุห่อหุ้มแท่งเซลล์อาจจะทำให้ขั้วไฟฟ้าเสียหายได้ การนำแท่งเซลล์ลงฝังในคอนกรีตเป็นผลดีต่อแท่งเซลล์คือเป็นตัวยึดให้แท่งเซลล์ไม่เสียหายถึงแม้จะมีการหลอมของตะกั่ว อีกทั้งยังสามารถนำคอนกรีตเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์กับแหล่งความร้อนสูงได้ เนื่องจากเล็งการหลอมของตะกั่วในแท่งเซลล์ที่ไม่ได้ฝังในคอนกรีต ในการทดลองผู้ทดลองจึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 200 °C ทั้งระบบ จากการทดลองคอนกรีตเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำไปใช้ในอุณหภูมิสูงได้เนื่องจากมีความเป็นฉนวนความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองสื่อสารภายนอก ฝ่ายสื่อสารและประชาสัมพันธ์องค์การ กฟผ. 2563. สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. [Online]. Available. : https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455
- [2] ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. 2560. การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้พลังงาน 6 เดือนแรกปี 2560. [Online]. Available. : <http://www.eppo.go.th/index.php/th/>
- [3] AIST. 2005. Electric Power Generated from Waste Heat. [Online]. Available. :https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2005/20050617/20050617.html
- [4] S. Karabetoglu, A. Sisman, Z. F. Ozturk and T. Sahin. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures, Energy Conversion and Management. 62(2012)47-50.
- [5] Lv, S.; Liu, M.; He, W.; Li, X.; Gong, W.; Shen, S. Study of thermal insulation materials influence on the performance of thermoelectric generators by creating a significant effective temperature difference. Energy Conversion and Management 2020, 207, 112516.
- [6] Naganathan, S.; Singh, C.S.J.; Shen, Y.W.; Kiat, P.E.; Thiruchelvam, S. Nanotechnology in Civil Engineering - A Review. Advanced Materials Research **2014**, 935, 151-154.
- [7] Raki, L.; Beaudoin, J.; Alizadeh, R.; Makar, J.; Sato, T. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials **2010**, 3(2), 918-942.
- [8] Sanchez, F.; Sobolev, K.; Nanotechnology in concrete – A review. Construction and Building Materials **2010**, 24(11), 2060-2071.
- [9] Dissanayake, D.M.K.W.; Jayasinghe, C.; Jayasinghe, M. T.R. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. Energy and Buildings **2017**, 135, 85-94.
- [10] Li, V.C.; Leung, C.K.Y. Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. Journal of Engineering Mechanics **1992**, 118(11), 2246-2264.

- [11] Sagar, R.V., Prasad, B.K.R.; Kumar, S.S. An experimental study on cracking evolution in concrete and cement mortar by the b-value analysis of acoustic emission technique. *Cement and Concrete Research* **2012**, 42(8), 1094-1104.
- [12] Goracci, G. ; Dolado, J. S. Elucidation of Conduction Mechanism in Graphene Nanoplatelets (GNPs)/Cement Composite Using Dielectric Spectroscopy. *Materials* **2020**, 13(2), 275.
- [13] Roychand, R.; De Silva, S.; Law, D.; Setunge, S. High volume fly ash cement composite modified with nano silica, hydrated lime and set accelerator. *Materials and Structures* **2016**, 49(5), 1997-2008.
- [14] Popov, V.N. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports* **2004**, 43(3), 61-102.
- [15] Lojka, M.; Lauermannová, A.-M.; Sedmidubský, D.; Pavlíková, M.; Záleská, M.; Pavlík, Z.; Pivák, A.; Jankovský, O. Magnesium Oxochloride Cement Composites with MWCNT for the Construction Applications. *Materials* **2021**, 14(3), 484.
- [16] Llobet, E. Gas sensors using carbon nanomaterials: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2013**, 179, 32-45.
- [17] De Jong, K. P. ; Geus, J. W. Carbon Nanofibers: Catalytic Synthesis and Applications. *Catalysis Reviews* **2000**, 42(4), 481-510.
- [18] Wang, W.; Sha, A.; Lu, Z.; Jia, M.; Jiang, W.; Liu, Z.; Yuan, D. Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms. *Construction and Building Materials* **2021**, 269, 121267.
- [19] Zhou, Y.; He, J.; Wang, H.; Qi, K.; Ding, B.; Cui, S. Carbon nanofiber yarns fabricated from co-electrospun nanofibers. *Materials & Design* **2016**, 95, 591-598.
- [20] Geim, A.K.; Novoselov, K.S. The rise of graphene. *Nature Materials* **2007**, 6(3), 183-91.
- [21] Compton, O. C.; Nguyen, S. T. Graphene oxide, highly reduced graphene oxide, and graphene: versatile building blocks for carbon-based materials. *Small* **2010**, 6(6), 711-23.
- [22] Gholampour, A.; Kiamahalleh, M. V.; Tran, D. N. H.; Ozbakkaloglu, T.; Losic, D. From Graphene Oxide to Reduced Graphene Oxide: Impact on the Physiochemical and

Mechanical Properties of Graphene–Cement Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2017**, 9(49), 43275-43286.

[23] Cao, M.; Zhang, C.; Wei, J. Microscopic reinforcement for cement based composite materials. *Construction and Building Materials* **2013**, 40, 14-25.

[24] Namsone, E.; Sahmenko, G.; Namsone, E.; Korjakins, A. Thermal conductivity and frost resistance of foamed concrete with porous aggregate, *Environment. Technology. Resources*. In Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia, 15–17 June 2017; Volume 3, pp. 222–228.

[25] Wang, W.; Sha, A.; Lu, Z.; Jia, M.; Jiang, W.; Liu, Z.; Yuan, D. Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms. *Construction and Building Materials* **2021**, 269, 121267.

[26] Dngphoon Kang, Kang Seok Seo, HeeYoung Lee, Wonseok Chung Experimental study on mechanical strength of GO-cement composites, *Construction and Building Materials* 131 (2017) 303-308.

[27] Phrompet, C.; Sriwong, C.; Ruttanapun, C. Mechanical, dielectric, thermal and antibacterial properties of reduced graphene oxide (rGO)-nanosized C3AH6 cement nanocomposites for smart cement-based materials. *Composites Part B: Engineering* **2019**, 175 107128.

[28] Du, M.; Jing, H.; Gao, Y.; Su, H.; Fang, H. Carbon nanomaterials enhanced cement-based composites: advances and challenges. *Nanotechnology Reviews* **2020**, 9, 115-135.

[29] Xu, Z.; Gao, C. Aqueous Liquid Crystals of Graphene Oxide. *ACS Nano* **2011**, 5(4), 2908-2915.

[30] ยุทธนา กอสัมพันธ์, อมรเทพ แก้วไทย, จิโรจ ชาครวงศ์ไพสิฐและอุกฤษ ชูดวง. 2554. “การออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยสยาม. 30

[31] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์และนวกัทยา หนูนาค. 2555. ปรากฏการณ์ซีเบค. [Online]. Available. : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6808/seebeck-effect-ปรากฏการณ์ซีเบค>

- [32] ณรงค์ สัจวารธนที. 2552. “การศึกษาการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากเตาเศรษฐกิจ.” โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [33] เชรขฐา รัตนพันธ์. 2562. เทอร์โมอิเล็กทริกส์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดมีนเซอร์วิส ซัพพลาย.
- [34] Wikipedia, the free encyclopedia. Bismuth telluride. [3 April 2020]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_telluride
- [35] ดร.ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ. “แกรฟีนวัสดุ 2 มิติเพื่ออนาคต”. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ . [3 April 2020]. Available from: https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/302_65.pdf
- [36] Bolotin, K. I. and et al. 2008. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. Solid State Communications. 146(9-10): 351-355.
- [37] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim, Rev. Mod. Phys., Vol. 81, 109 – Published 14 January 2009.
- [38] Wan, X., Huang, Y., and Chen, Y. (2012). Focusing on energy and optoelectronic applications: a journey for graphene and graphene oxide at large scale. Acc. Chem. Res. 45, 598–607. doi: 10.1021/ar 200229q
- [39] Hummers, W.S. and Offeman, R.E. 1958 Preparation of Graphitic Oxide. Journal of the American Chemical Society, 80, 1339-1339.
- [40] Khairir, N. and et al. 2015. Study of Reduced Graphene Oxide for Trench Schottky Diode. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 99(8): 012031.
- [41] มอาร์ทาร์ไทย. 2559. นิยามของคอนกรีต. [Online]. Availabel. : <http://mortarhai.blogspot.com/2016/09/2.html>.
- [42] Teeraphon. 2563. ปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อทั่วไปต่างจากปูนมอาร์ทาร์อย่างไร. [Online]. Available. : <https://tipsforconstruction.wordpress.com/2020/03/27>
- [43] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2562. X-ray Diffactometer XRD. [Online]. Available. : <https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/17.html>.

- [44] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). 2560. แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี. [Online]. Available. : https://www.slri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=401:2011-03-15-03-57-51&catid=50:2010-11-02-00-08-36.
- [45] NANOTEC. Thermogravimetric Analysis (TGA). [Online]. Available. : <https://nanotec.tancloud/thermogravimetric-analysis-tga>
- [46] ภก.เมธัส ซอพิติพร, “รามาน สเปกโตรสโคปี: หลักการและการประยุกต์ใช้” วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม 25 (มกราคม 2561)
- [47] J. Mater Chem. 2012. Synthesis, processing, and thermoelectric properties of bulk nanostructured bismuth telluride (Bi_2Te_3), 725-730
- [48] จักรกฤษ กอบพันธ์. 2559. คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้น สกัดจากเปลือกไข่ไก่. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [49] C.Lertsatitthanakorn, J.Jamradloedluk and M.Rungsiyopas. 2014. Electricity generator from a solar parabolic concentrator coupled to a thermoelectric module. Energy Procrdia, 150-158.
- [50] S.Inthachai , W.Prapaporn , K.Singsoog and T.Seetawan. 2019. Fabrication of New Thermoelectric Block Floor for Power generator. Journal of Physics. 012002.
- [51] Bernd Wicklein, Andraž Kocjan, German Salazar-Alvarez, Federico Carosio, Giovanni Camino, Markus Antonietti and Lennart Bergström, Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide, Nature Nanotechnology, 10 (2015) 277-283.
- [52] Liu, Y.; Wang, F.; Liu, M.; Hu, S. A microstructural approach to adherence mechanism of cement and asphalt mortar (CA mortar) to repair materials. Construction and Building Materials 2014, 66, 125–131.
- [53] Suk, J.W.; Piner, R.D.; An, J.; Ruoff, R.S. Mechanical Properties of Monolayer Graphene Oxide. ACS Nano 2010, 4(11), 6557-6564.
- [54] Carrasco, M.; Del Campo, A.; Rubia, M.A.; Reyes, E.; Moragues, A.; Fernández, J. New insights in weathering analysis of anhydrous cements by using high spectral and spatial

resolution Confocal Raman Microscopy, *Cement and Concrete Research* 2017, 100, 119-128.

[55] Singh, L.P.; Goel, A.; Bhattacharyya, S.K.; Ahalawat, S.; Sharma, U.; Mishra, G. Effect of Morphology and Dispersibility of Silica Nanoparticles on the Mechanical Behaviour of Cement Mortar. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2015, 9(2), 207-217.b

[56] Lv, S.; Ma, Y.; Qiu, C.; Sun, T.; Liu, J.; Zhou, Q. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials* 2013, 49, 121-127.

[57] Qureshi, T. S.; Panesar, D.K. Impact of graphene oxide and highly reduced graphene oxide on cement based composites. *Construction and Building Materials* 2019, 206, 71-83.

[58] M.A. Rafiee, T.N. Narayanana, D.P. Hashim, N. Sakhavand, R. Shahsavari, R. Vajtai, R.M. Ajayan, Hexagonal boron nitride and graphite oxide reinforced multifunctional porous cement composites, *Adv. Funct. Mater.* 23 (45) (2013) 5624–5630.

[59] Qian, Y.; Abdallah, M.Y.; Kawashima, S. Characterization of cement-based materials modified with graphene-oxide. *Nanotechnology in Construction* 2015, 259-264.

[60] Liu, L.; Zhang, J.; Zhao, J.; Liu, F. Mechanical properties of graphene oxides. *Nanoscale* 2012, 4(19), 5910-5916.

[61] Zhou, X.-Y.; Zheng, F.; Li, H.-G.; Lu, C.-L. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* 2010, 42(7), 1070-1074.

[62] Yousefi, A.; Tang, W.; Khavarian, M.; Fang, C.; Wang, S. Thermal and Mechanical Properties of Cement Mortar Composite Containing Recycled Expanded Glass Aggregate and Nano Titanium Dioxide. *Applied Sciences* 2020, 10, 2246.

[63] Lv, S.; Liu, M.; He, W.; Li, X.; Gong, W.; Shen, S. Study of thermal insulation materials influence on the performance of thermoelectric generators by creating a significant effective temperature difference. *Energy Conversion and Management* 2020, 207, 112516.

[64] Li, J.; Xiang, Q.; Ze, R.; Ma, M.; Wang, S.; Xie, Q.; Xiang, Y. Thermal and electrical analysis of SiGe thermoelectric uncouple filled with thermal insulation materials. *Applied Thermal Engineering* **2018**, 134, 266-274.

[65] Mahanta, N.; Abramson, A. Thermal conductivity of graphene and graphene oxide nanoplatelets. *13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* **2012**.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวธิดาทิพย์ จันทระเจริญ
วัน/เดือน/ปีเกิด	8 กันยายน 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	601 หมู่ 1 ตำบลท่าขอนยาง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2546-2552 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนเซนต์ยอแซฟกาฬสินธุ์ พ.ศ.2552-2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัย มหาสารคาม (ฝ่ายมัธยม) พ.ศ.2558-2562 ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง พ.ศ.2562-2565 กำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานการตีพิมพ์	T. Janjaroen, S. Khammahong, W. Tuichai, A. Karaphun, C. Phrompet, C. Sriwong and C. Ruttanapun. (2022). The Mechanical and Thermal Properties of Cement CAST Mortar/Graphene Oxide Composites Materials. International Journal of Concrete Structures and Materials. 16, doi.org/10.1186/s40069-022-00521-z