

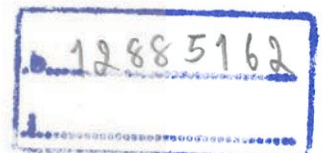
คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง
โดยใช้ สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่

HIGH TEMPERATURE THERMOELECTRIC CONCRETE
BLOCK IS USED RAW MATERIAL FROM EGG SHELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง
โดยใช้ สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่
HIGH TEMPERATURE THERMOELECTRIC CONCRETE
BLOCK IS USED RAW MATERIAL FROM EGG SHELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH TEMPERATURE THERMOELECTRIC CONCRETE BLOCK IS USED RAW MATERIAL FROM EGG SHELLS



A SPECAIL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่

High Temperature Thermoelectric Concrete Block is Used Raw Material from Egg Shells

ชื่อนักศึกษา

นายจักรกฤษ กอบพันธ์ รหัสนักศึกษา 56051120

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการ	
ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่
ชื่อนักศึกษา	นายจักรกฤษ กอบพันธ์ รหัสนักศึกษา 56051120
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกของมนุษยชาติในการสรรหาพลังงานไฟฟ้าสำหรับบริโภคในยามที่เข้าสู่ยุควิกฤตขาดแคลนพลังงาน โดยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้ารูปแบบใหม่ที่ยึดเอาหลักการเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้นั้นคือ คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยเริ่มตั้งแต่การสังเคราะห์สารตั้งต้นจากเปลือกไข่ไก่ เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยได้ทำการเผาเปลือกไข่ไก่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และได้นำสารตั้งต้นที่สกัดได้จากเปลือกไข่มาสังเคราะห์สารประกอบเทอร์โมอิเล็กทริก CaMnO_3 โดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง และสร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ CaMnO_3 จำนวน 20 โมดูล ในขณะเดียวกันทำการออกแบบคอนกรีตบล็อกและการหล่อคอนกรีต ขนาด $17 \times 17 \times 3.5$ เซนติเมตร จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏว่าคอนกรีตบล็อกสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ 1.487 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 530 μA ที่ผลต่างอุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส จากนั้นได้ทดลองให้ความร้อนแก่คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้คงที่ที่ผลต่างอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ตั้งแต่หลังให้ความร้อนผ่านไป 1 ชั่วโมง และคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าก็สามารถที่จะสร้างแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมาได้คงที่ โดยมีค่า 0.704 V และ 1.637 mA ตามลำดับ

คำสำคัญ : คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก, แคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	High Temperature Thermoelectric Concrete Block is Used Raw Material from Egg Shells
Students	Mr.Jakrit Gobpant Student ID 56051120
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst.Prof.Dr.Chesta Rattanapun

ABSTRACT

This special project was designed to be the choice of mankind to recruit energy for consumption when it comes to energy shortages. By designing a new generation of electrical systems based on thermoelectric principles, is a High temperature thermoelectric concrete block. By starting from synthesis the substrate from egg shells. To obtain calcium oxide (CaO), the egg shell was burnt at 900 ° C for 2 hours. The precipitate was extracted from the eggshell to synthesize CaMnO₃ thermoelectric compounds burnt at 1200 ° C for 12 hours and make 20 thermoelectric modules from CaMnO₃ compound. At the same time, the design of concrete block and its concrete molding is an important factor in converting heat into electricity from thermoelectric materials. By designing, a thermoelectric concrete block size of 17×17×3.5 cm. Electrical properties of thermoelectric concrete blocks were measured with various temperature different. It shows that can generate 1.487 V and current 530 μA at temperature different 420 ° C. Then the thermoelectric concrete blocks heat for 8 hours at 500 ° C. Thermoelectric concrete blocks can produce a constant temperature difference at 220 ° C, since the latter is heated for one hour and the electrical properties are able to generate a constant voltage and current, 0.704 V and 1.637 mA respectively.

Keywords : calcium oxide , thermoelectric concrete block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้ของข้าพเจ้าได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความร่วมมือและช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย โดยมีบุคคลดังต่อไปนี้

ผศ.ดร. เชนษฐา รัตนพันธ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยและยังเป็นผู้ที่ให้คำแนะนำ แนวทางในการทำวิจัยเสมอมาและได้ให้โอกาสในการเรียนรู้อะไรมากมายอีกทั้งยังเป็นต้นแบบในการทำวิจัยของข้าพเจ้า และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ข้าพเจ้าให้ความเคารพและนับถือ

ดร. ปิยวัฒน์ ทัพสนิท นักวิจัยหลังปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ความเข้าใจ ในการทำงานเป็นระบบ และยังเป็นผู้ที่ฝึกอะไรหลายๆอย่างให้ข้าพเจ้า อีกทั้งยังเป็นเป็นผู้ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตหลายๆอย่างซึ่งมีทั้งที่เข้าใจและไม่เข้าใจ

ดร. ศักดิ์วิบูลย์ จันทราช นักวิจัยหลังปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้และข้อคิดในการทำวิจัย ว่าเราควรมองปัญหาหรือโจทย์ในการวิจัยอย่างไร อีกทั้งยังเป็นผู้ใหญ่ที่ข้าพเจ้าให้ความนับถือ

นาย ชัยวัฒน์ พรหมเพชร นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำ อีกทั้งยังเป็นพี่ที่มีน้ำใจช่วยเหลือข้าพเจ้าในหลายๆอย่าง

นาย เอลิมพล รุจรดวงค์ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นพี่ที่คอยให้ความรู้ในด้านของวัสดุศาสตร์แก่ข้าพเจ้า และเป็นคนที่มีความน้ำใจคอยช่วยเหลือข้าพเจ้าอย่างดีเสมอมา

นาย พลภุช ใคว์เจริญ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นพี่ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการวิจัยเป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นคนที่คอยชวนข้าพเจ้าให้ออกกำลังกายเป็นประจำ

นาย ศฤงคาร จันทรประทีป นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นพี่ที่ได้คอยให้คำแนะนำหลักการปฏิบัติ ให้แก่ข้าพเจ้าในตอนเริ่มต้นที่ข้าพเจ้ายังไม่มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือต่างๆ และเป็นคนที่มีความน้ำใจคอยช่วยเหลือข้าพเจ้าอย่างดีเสมอ

นาย จักรพงษ์ คำจันทร์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นพี่ที่น่ารักแล้วก็ยังเป็นคนที่คอยช่วยเหลือข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ, ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข และ อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ ในความกรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการในการคุมสอบข้าพเจ้า

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยช่วยเหลือ และให้ความสนับสนุน ถ้าหากโครงการพิเศษนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จักรภุช กอบพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการทำวิจัยและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เปลือกไข่ไก่ (Egg shells)	4
2.2 หลักการพื้นฐานทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Basic principles of thermoelectric)	6
2.2.1 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.2.2 ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของพาหุประจุ	7
2.2.3 ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	7
2.2.4 ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของโฮล	9
2.3 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric properties)	10
2.3.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค	10
2.3.2 สภาพนำความร้อน	10
2.3.3 สภาพนำไฟฟ้า	12
2.3.4 สภาพต้านทานไฟฟ้า	12
2.3.5 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	12
2.4 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	13
2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	14
2.5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	15
2.6 คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)	16
2.6.1 นิยามของคอนกรีต	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 องค์ประกอบของคอนกรีต	16
2.6.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม	17
2.6.4 ข้อดีและข้อเสียของคอนกรีต	17
2.6.5 วัสดุผสมคอนกรีต	18
2.6.6 คอนกรีตมวลเบา	20
2.7 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง	21
2.7.1 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง	22
2.8 หลักการถ่ายเทความร้อน	23
2.9 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า	25
2.10 หลักการวิเคราะห์ X-ray diffraction	27
2.11 โครงสร้างผลึกของ CaMnO_3	28
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.12.1 Park et al. (2007)	29
2.12.2 Kittisakchai et al.	30
2.12.3 Tosawat et al. (2014)	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.3 การเตรียมผลึกแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่	32
3.4 การสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ CaMnO_3	34
3.5 การออกแบบและสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล CaMnO_3	37
3.6 วิธีการทดลอง	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	49
4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง (Structure properties)	49
4.2 คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	3
2.1 องค์ประกอบของเปลือกไซตรัสธรรมชาติและเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ	5
2.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง	22
2.3 แสดงระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง	22
2.4 แสดงระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ	23
3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ CaMnO_3	34
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคอนกรีตบล็อก เทอร์โมอิเล็กทริกระหว่าง R_{IN} กับ T	52
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตร้าของการตรวจด้วยเครื่อง XRD	5
2.2 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค	8
2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	8
2.4 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของโลหะเมื่อกระแสไฟฟ้าไหล	9
2.5 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบอัดแกนเดียว	14
2.6 แสดงการเชื่อมต่อของวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ต่อขนานกัน	15
2.7 แสดงการเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็น (N-Type) ต่ออนุกรมกัน	16
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	28
2.9 Perovskites Structure	29
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียมผงผลึกแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	32
3.2 เปลือกไข่ไก่หลังจากล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง	33
3.3 เปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 900 °C	33
3.4 การ Ballmill	34
3.5 การเผาสาร	35
3.6 แท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก	35
3.7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียมสาร CaMnO_3	36
3.8 แบบจำลองของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	37
3.9 ขั้นตอนการทำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	37
3.10 แบบจำลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง	38
3.11 แบบจำลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง	38
3.12 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการทำคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก	39
3.13 ชุดการทดลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก	40
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่ไก่ ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	42
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CaMnO_3 แคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง	43
4.3 รูปคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก	44
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับอุณหภูมิ	45
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ	46
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกกับผลต่างอุณหภูมิ	47
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกกับผลต่างอุณหภูมิ	48
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับเวลา	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับเวลา	51
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับเวลา	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติ ที่ถูกใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีอยู่อย่างจำกัดและลดลงเรื่อยๆ ถึงแม้จะมีพลังงานทางเลือกเข้ามาทดแทน ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการและยังไม่ตอบโจทย์ในทุกบริบทของประเทศ เช่น พลังงานลม เนื่องจากลมไม่ได้พัดตลอดเวลาและความแรงไม่สม่ำเสมอ ขาดความต่อเนื่องและไม่คงที่, พลังงานแสงอาทิตย์ ไม่มีในตอนกลางคืนและมีความเข้มน้อยในตอนเช้าและตอนเย็นหรือในวันที่มีเมฆมาก, พลังงานน้ำ นอกจากแปรผันตามฤดูกาลแล้ว ยังขึ้นกับปริมาณน้ำที่ต้องนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น อย่างไรก็ตาม พลังงานทางเลือกต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นยังมีต้นทุนในการผลิตที่สูงเมื่อเทียบกับต้นทุนของพลังงานหลัก อย่าง ก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและค้นคว้าถึงพลังงานทางเลือกใหม่ โดยการนำวัสดุที่ไม่ใช้ประโยชน์มากกลับมาใช้ใหม่ โดยการสังเคราะห์เปลือกไขไก่ เป็น CaMnO_3 จากการศึกษางานวิจัยทำให้ทราบว่า CaMnO_3 มีคุณสมบัติทางโครงสร้าง เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางตรงข้ามการนำพลังงานไฟฟ้ามาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การผันรูปพลังงานดังกล่าวเราเรียกว่า เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจาก แหล่งพลังงานความร้อนมีอยู่มากมาย อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรม เตาหลอมโลหะ ยานพาหนะ เตาหุงต้ม กล่าวได้ว่าในทุกกิจกรรมของมนุษย์มีความร้อนเหลือทิ้งเกิดขึ้น ซึ่งถ้าหากมีการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง มาผันกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จะช่วยให้เราสามารถนำพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และอาจจะเป็นอีกหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก ที่จะช่วยส่งเสริมความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ การผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าในทางปฏิบัตินั้น จะใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนำมาสร้างเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เพื่อใช้สำหรับการผันพลังงาน

ข้อจำกัดและปัญหาหลักของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก คือ จำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนหรือฮีตซิงค์ เพื่อสร้างผลต่างอุณหภูมิให้กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบการใช้งานและทำให้ใช้งานยากเกินความจำเป็น จึงทำให้ไม่ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย

ในงานวิจัยนี้ได้ สังเคราะห์สารประกอบประเภทออกไซด์ CaMnO_3 เพราะ เตรียมง่าย ไม่เป็นพิษ มีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิ (500-900 °C) [1] ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ผันพลังงานความร้อนเป็นไฟฟ้าได้จากแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง ได้ทั้งในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรม และมีเป้าหมายในการแก้ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก คือ การออกแบบให้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สามารถที่จะสร้างผลต่างอุณหภูมิได้ในตัวเอง โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนหรือฮีตซิงค์ จึงเป็นที่มาในการสร้างและออกแบบ คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไขไก่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและสังเคราะห์ CaO จากเปลือกไข่ไก่
- 1.2.2 ศึกษาและสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก CaMnO_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction method)
- 1.2.3 ศึกษาและสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากสารประกอบออกไซด์ CaMnO_3
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติและออกแบบวัสดุคอนกรีต
- 1.2.5 ศึกษาและสร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์ผงผลึก CaO จากวัสดุเปลือกไข่ไก่ และตรวจสอบโครงสร้างผลึก
- 1.3.2 สังเคราะห์ผงผลึก CaMnO_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 1.3.3 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผงผลึก CaMnO_3
- 1.3.4 สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากสารประกอบ CaMnO_3
- 1.3.5 สร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้สังเคราะห์และศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ CaMnO_3
- 1.4.2 ได้เป็นองค์ความรู้ใหม่สามารถนำไปเสนอในงานวิชาการต่างๆได้
- 1.4.3 ได้คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง
- 1.4.4 ได้องค์ความรู้ในการนำเปลือกไข่ มาสังเคราะห์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 1.4.5 ได้แนวทางในการนำความร้อนเหลือทิ้ง ในระดับครัวเรือนหรือในระดับอุตสาหกรรม ประเภทต่างๆที่มีความร้อนเหลือทิ้ง มาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน
- 1.4.6 ได้องค์ความรู้ในการสร้างผลต่างอุณหภูมิในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนหรือฮีตซิงค์

1.5 ขั้นตอนการทำวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีหลักการใช้งานคอนกรีตและการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อก
- 1.5.3 สังเคราะห์ผงผลึก CaO จากวัสดุเปลือกไข่ไก่
- 1.5.4 สังเคราะห์ผงผลึก CaMnO_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 1.5.5 สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากสารประกอบ CaMnO_3
- 1.5.6 สร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง
- 1.5.7 ทดสอบการทำงานของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง
- 1.5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนและแผนดำเนินการวิจัย

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

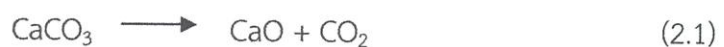
ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของเปลือกไข่ไก่และคอนกรีตเทคโนโลยี ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก กระบวนการสังเคราะห์สาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารที่ทำการสังเคราะห์ โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 2.1 เปลือกไข่ไก่ (Egg shells)
- 2.2 หลักการพื้นฐานทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Basic principles of thermoelectric)
- 2.3 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric properties)
- 2.4 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 2.6 คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)
- 2.7 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง
- 2.8 หลักการถ่ายเทความร้อน
- 2.9 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า
- 2.10 หลักการวิเคราะห์ X-ray diffraction
- 2.11 โครงสร้างโครงผลึกของ CaMnO_3
- 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เปลือกไข่ไก่ (Egg shells) [2] [3] [4]

เปลือกไข่ (Egg shells) คือ ส่วนนอกของไข่ไก่ มีลักษณะเป็นของแข็ง อาจมีสีน้ำตาลหรือสีขาว ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ไก่ เปลือกไข่ประกอบด้วย 2 ส่วน ชั้นเปลือกไข่ (Egg Membrane) ซึ่งเป็นชั้นของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยเส้นใยโปรตีน และอีกชั้นเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก

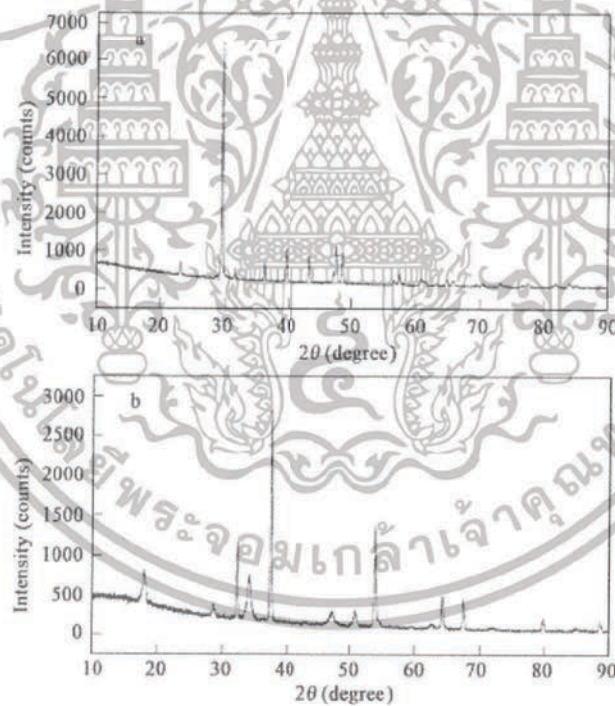
ได้มีการศึกษาองค์ประกอบของเปลือกไข่ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction พบว่าในเปลือกไข่ธรรมชาติมีแคลเซียม (Ca) ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกอน เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 91.94 และ 4.30 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.1 เมื่อนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการ Calcination เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึงอุณหภูมิ $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และความชื้นในเปลือกไข่ รวมทั้งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปสารประกอบในโครงสร้างเปลือกไข่จากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ดังสมการที่ (2-1) เปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination แล้วแคลเซียม (Ca) ในเปลือกไข่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่านั้น ซึ่งคิดเป็นแคลเซียม (Ca) ร้อยละ 99.63 ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1(a-b)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของเปลือกไซธรรมชาติและเปลือกไซที่ผ่านกระบวนการ Calcination ซึ่งตรวจสอบด้วยวิธี X-ray Diffraction

องค์ประกอบ	เปลือกไซธรรมชาติ ปริมาณ (%)	เปลือกไซที่ผ่านกระบวนการ Calcination ปริมาณ (%)
Ca	91.94	99.63
Si	4.30	0.14
Al	1.44	-
Na	0.53	-
K	0.48	-
F	0.42	-
P	0.32	0.06
Cl	0.25	0.16
Sr	0.16	-



รูปที่ 2.1 สเปกตรากของการตรวจด้วยเครื่อง XRD

(a) เปลือกไซธรรมชาติ

(b) เปลือกไซที่ผ่านกระบวนการ Calcination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการพื้นฐานทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Principles of thermoelectric)

2.2.1 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก [5] [6]

เทอร์โมอิเล็กทริก มาจากคำว่า ความร้อน (Thermal) และ ไฟฟ้า (Electrical) โดยที่ความหมายจะสื่อให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าและไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ โดยเทอร์โมอิเล็กทริก คือ ศาสตร์ที่ศึกษาการไหลของประจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากผลต่างอุณหภูมิหรือในทางตรงกันข้าม ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ก็เป็นพาหะอิสระ ที่นำความร้อนไปกับตัวมันด้วย จึงทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิ ได้เช่นเดียวกัน ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการ ดังต่อไปนี้

1. ความร้อนและศักย์ไฟฟ้า

ทั้งการไหลของประจุไฟฟ้าและความร้อนในตัวกลาง ต่างก็เกิดจาก แรง (Driven force) โดยที่แรงในที่นี้ไม่ได้จำกัดเฉพาะเจาะจงว่าเป็นแรงในทางกลศาสตร์นิวตันเท่านั้น แต่หมายถึง อำนาจที่ทำให้เกิดการไหล โดยอำนาจที่ทำให้เกิดการไหลนั้น เกิดจากการที่มีเกรเดียนต์ (Gradient) ของอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้า ดังเช่น เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ $-\nabla T$ คือ แรงที่ทำให้เกิดการไหลของความร้อน และ เกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า $-\nabla V$ คือ แรงที่ทำให้เกิดการไหลของประจุไฟฟ้า ส่วนเครื่องหมายลบแสดงถึงทิศทางของการไหลของประจุไฟฟ้าและความร้อน ที่ไหลจากจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าหรืออุณหภูมิที่สูง ไปยังจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าหรืออุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งหากปริมาณการไหลในตัวกลางของประจุไฟฟ้าและความร้อน มีการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะถูกเรียกว่า Electric flux (\vec{J}) และ Heat flux (\vec{J}_Q) ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\vec{J} = -\sigma \nabla V \quad (2.2)$$

$$\vec{J}_Q = -K \nabla T \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า และ K คือ สภาพการนำความร้อน ซึ่งสมการที่ (2.2) คือกฎของโอห์ม และสมการที่ (2.3) คือกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์

2. ผลกระทบของการคู่ควบกันระหว่างอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขและข้อจำกัดของกฎของโอห์มและกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ จะพบว่า ในส่วนกฎของโอห์มนั้น เป็นการมองว่าการไหลของประจุไฟฟ้าในตัวกลาง เกิดจากเกรเดียนต์ ของศักย์ไฟฟ้า เท่านั้น โดยที่ตัวกลางจะต้องมีอุณหภูมิต่างที่ ส่วนกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ มองว่าความร้อนที่ไหลในตัวกลางได้นั้น เป็นผลมาจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในตัวกลางเท่านั้น โดยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่ทว่าในความเป็นจริงแล้ว เกรเดียนต์ของอุณหภูมิก็ส่งผลต่อการไหลของประจุไฟฟ้าในตัวกลาง เช่นเดียวกันเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้ายิ่งส่งผลต่อการไหลของความร้อนในตัวกลาง ซึ่งเป็นที่มาของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ตามลำดับ

2.2.2 ปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric effect) เริ่มถูกค้นพบในช่วงต้นศตวรรษที่ 18 ซึ่งเป็นยุคของการพัฒนาทฤษฎีด้านวัสดุสถานะของแข็ง (Solid state) ในการศึกษาฟิสิกส์พื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางความร้อนในวัสดุของแข็ง ได้นำไปสู่การค้นพบปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในขณะที่คุณสมบัติทางความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีความต่างศักย์ไฟฟ้าในวัสดุ ดังนั้น ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงานระหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าในวัสดุของแข็ง ทำให้เราสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ด้วยความร้อนและทำความร้อนได้ด้วยกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจึงสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของการเปลี่ยนรูปพลังงาน นั้นคือ 1) ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน 2) ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่ทั้ง 2 ปรากฏการณ์สามารถย้อนกลับหากันและกันได้ ดังนั้นปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์แบบผันกลับได้ (Reversible effect) ในการพิจารณาภาคต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในวัสดุ จะเริ่มจากฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยแยกพิจารณาปรากฏการณ์ตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics law) คือ แยกพิจารณาเป็นปรากฏการณ์ที่ผันกลับได้ (Reversible effect) และปรากฏการณ์ที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible effect)

ปรากฏการณ์ที่ผันกลับได้ในปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นประกอบไปด้วย 3 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ส่วนปรากฏการณ์ที่ผันกลับไม่ได้ ที่เกี่ยวข้องในปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นก็คือ ปรากฏการณ์การสร้างความร้อนจูล (Joule heating)

2.2.3 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ในปี ค.ศ.1821 โทมัส จอห์น ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันค้นพบว่า “เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำสองชนิด จะเกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อวงจรปิด”

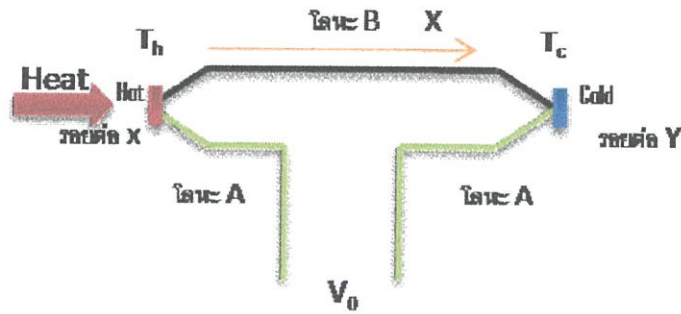
ปรากฏการณ์ซีเบค เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างอุณหภูมิในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.4)$$

โดยที่ S = สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

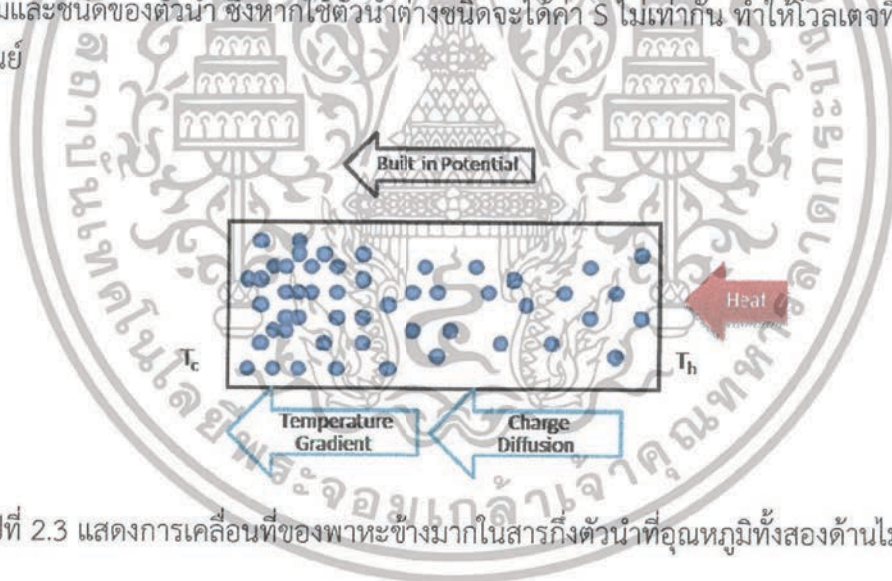
V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

T = อุณหภูมิ (K)



รูปที่ 2.2 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค

จากรูปที่ 2.2 เส้นลวดโลหะสองชนิด (โลหะ A และ โลหะ B) ถูกเชื่อมต่อโดยจุดเชื่อมรอยต่อ X ซึ่งมีอุณหภูมิสูง (T_h) และจุดเชื่อมรอยต่อ Y ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (T_c) พาหะมีประจุ (Carrier) ในตัวนำจะมีทิศทางการแพร่ (Diffusion) ไปในทิศทางเดียวกันกับการถ่ายเทอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ตามทิศทาง X ที่บริเวณฝั่งด้านร้อนพาหะจะมีพลังงานสูงจึงพยายามแพร่ไปหาด้านที่เย็นกว่าเพื่อลดพลังงานลงทำให้พาหะไฟฟ้าอยู่ในภาวะสมดุล เนื่องจากลวดตัวนำทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกัน จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิหรือสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) ไม่เท่ากันและทำให้เกิดแรงดันคร่อมจุดเชื่อมต่อทั้งสอง ค่า S จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ โครงสร้างอะตอมและชนิดของตัวนำ ซึ่งหากใช้ตัวนำต่างชนิดจะได้ค่า S ไม่เท่ากัน ทำให้โวลเตจที่ได้จะมีค่าไม่เป็นศูนย์



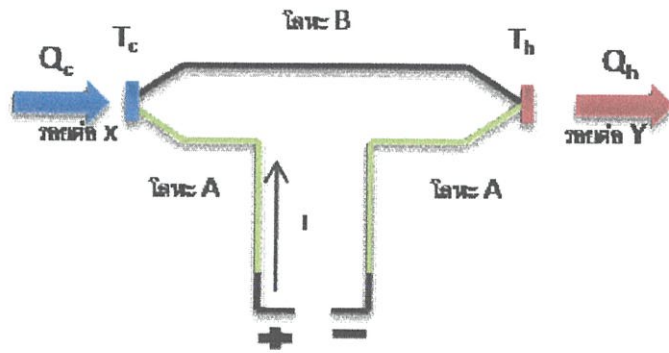
รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

พาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางการแพร่ (Diffusion) เป็นไปตาม รูปที่ 2.3 คือ พาหะมีการไหลตามทิศทางการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การแพร่ของพาหะข้างมาก ก็จะเกิดการไหลของกระแส

2.2.4 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)

ใน ค.ศ. 1834 ยีน ชาร์เลส อะธานเนส เพลเทียร์ (Jean Charles Athanase Peltier) กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า” ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของโลหะเมื่อกระแสไฟฟ้าไหล

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกจะพบว่าที่ด้านหนึ่งของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิจะต่ำและอีกด้านหนึ่งอุณหภูมิจะสูง ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ความร้อนของพาหะขณะเคลื่อนที่เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงทำให้ด้านทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ดูดซึมทางด้านเย็นกับกระแสไฟฟ้าดังนี้

$$Q_{\text{absorb}} = (\Pi_1 - \Pi_2)I \quad (2.5)$$

- Q_{absorb} คือ ความร้อนที่พาหะตัวนำสามารถพาไปได้ (W)
 Π คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์หรือพลังงานความร้อนที่ประจุไฟฟ้า 1 ประจุสามารถพาไปได้ (V)
 I คือ กระแสที่ไหลอยู่ในตัวนำ (A)

2.3 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric properties)

สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก จะประกอบด้วย สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient), สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity), สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity), สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity), ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Dimensionless Figure of merit (ZT) ซึ่งจะลงรายละเอียดต่อไป

2.3.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient; S) เกิดขึ้นเนื่องจากมีความต่างของอุณหภูมิ ความต่างของอุณหภูมินั้นจะทำให้พาหะข้างมากเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า แต่อิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสองทิศทาง โดยอิเล็กตรอนกลุ่มแรกจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปสู่บริเวณที่เย็นกว่า เนื่องจากถูกขับเคลื่อนโดยพลังงานความร้อนที่ได้รับ ต่อมาการสะสมของอิเล็กตรอนร้อนนี้ จะทำให้อุณหภูมิในเขตเย็นสูงขึ้น และก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (V) และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจึงถูกนิยามว่า เป็นอัตราส่วนของผลต่างของศักย์ (ΔV) กับผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT)

$$S = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)

เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (Thermal Conductivity) เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลางเดียวกัน หรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกันโดยอาศัยผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในตัวกลาง การนำความร้อนในของแข็ง เกิดจากการสั่นของโมเลกุลและถ่ายโอนพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ ผลรวมของสภาพนำความร้อน (K) จะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ เทอมแรกจะเป็นของอิเล็กตรอนอิสระและแลตทิซ ดังนี้

$$K = (K_e + K_l) \quad (2.7)$$

เมื่อ K_e คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระ

K_l คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของแลตทิซ

สภาพนำความร้อนโดยอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนนั้นนอกจากจะเป็นพาหะนำไฟฟ้าแล้วตัวมันเองยังสามารถเป็นพาหะนำความร้อนได้ด้วย ซึ่งสภาพการนำความร้อนของอิเล็กตรอนนั้นจะเกี่ยวข้องกับสภาพการนำไฟฟ้าด้วยเช่นกัน โดยที่ในเทอมของอิเล็กตรอน จะถูกอธิบายโดยกฎของไวด์แมนซ์ (Wiedemann-Franz law)

$$K_e = L_0 \sigma T \quad (2.8)$$

เมื่อ L_0 คือ ค่าคงที่โลเรนซ์ $2.44 \times 10^{-8} \text{ (W}^{-1} \Omega/\text{K}^2)$

σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (S/m)

T คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์ (K)

สภาพการนำความร้อนจากการสั่นของโครงผลึกหรือแลตทิซ โดยที่การสั่นของโครงผลึก (Lattice) เป็นกลไกหนึ่งของการส่งผ่านพลังงานความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นกลไกการนำความร้อนหลัก ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่ออะตอมในของแข็งมีการสั่นไปมาจากตำแหน่งสมดุลของมัน การสั่นของอะตอมเหล่านั้นจะส่งผลกระทบต่ออะตอมข้างเคียงในลักษณะที่เป็นคลื่น ดังนั้นอนุภาคควอนตัมของคลื่นการสั่นจากโครงผลึกเราจะเรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อเกิดกระเดียนต์ของอุณหภูมิ พลังงานความร้อนจะถูกส่งผ่านกลุ่มคลื่นที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึก สภาพการนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของโครงผลึกสามารถประมาณได้โดยใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Classical kinetic theory of gases) และพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าสภาพการนำความร้อนอย่างมากก็คือ กระบวนการเกิดการกระเจิงของโฟนอน เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดสภาพต้านทานความร้อนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = -\frac{1}{3} C_V \bar{IV} \quad (2.9)$$

เมื่อ C_V คือ ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่

\bar{I} คือ ระยะทางเฉลี่ยตลอดการชน

\bar{V} คือ ความเร็วเสียงเฉลี่ยในวัสดุ

2.3.3 สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (σ) คือ ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ที่เป็นตัวบ่งชี้ว่า ภายใต้อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งนั้น วัสดุจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเท่าใด และค่าสภาพการนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า กล่าวคือ ต้องการวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูง เนื่องจาก ในระหว่างกระบวนการทำงาน ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะต้องเคลื่อนที่ในวัสดุ ซึ่งถ้าวัสดุนำไฟฟ้าได้ดี ก็จะสามารถสูญเสียพลังงานจากความต้านทานไฟฟ้าน้อย สภาพนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$\sigma = nq\mu \quad (2.10)$$

ซึ่งสมการที่ 2.10 คือ สมการที่แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าขึ้นกับปัจจัยสำคัญ 2 ปัจจัย คือ ความหนาแน่นของพาหะ และ ค่าสภาพคล่องของพาหะอิสระ

2.3.4 สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ (resistivity) คือ ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ในรูปของอิเล็กตรอน วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ยาง แก้ว อิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกยึดเหนี่ยวไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นวัสดุฉนวนจึงมีความต้านทานสูง ส่วนอิเล็กตรอนในตัวนำจะถูกยึดเหนี่ยวไว้ภายในหลวมๆ จึงเคลื่อนที่ในตัวนำได้ แต่ไม่มีความเป็นระเบียบ เนื่องจากยังมีการชนกันอยู่บ้าง ความต้านทานของตัวนำจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพราะความร้อนมีผลให้อิเล็กตรอนชนกันมากขึ้นสำหรับในตัวนำที่มีสภาพนำยวดยิ่ง ไม่มีความต้านทานไฟฟ้าเหลืออยู่เลย เพราะอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นคู่ๆ โดยไม่มีการชนกัน จึงไม่เกิดพลังงานความร้อนในตัวนำยวดยิ่ง จากการที่ตัวนำยวดยิ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ ซึ่งจะพบในกลุ่มของสารตัวนำยวดยิ่ง แสดงถึงการนำไฟฟ้าได้ดีถ้าให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่สารตัวนำยวดยิ่งที่ขดเป็นวงจรมีปิด (closed loop) กระแสย่อมไหลอยู่เช่นนั้นตลอดไป โดยไม่มีการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน โดยไม่จำเป็นต้องให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากภายนอก หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้าให้วงตัวนำยวดยิ่งมีความต้านทานที่วัดได้เป็นค่าจำกัดค่าหนึ่ง กระแสที่ไหลในวงนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์

2.3.5 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ZT หรือ Dimensionless figure of merit หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{K} \quad (2.11)$$

โดย ZT คือ Dimensionless figure of merit

S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)

K คือ สภาพนำความร้อน (W/m K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

2.4 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

สามารถทำได้โดยการนำผงหรืออนุภาคมาอัดขึ้นเป็นรูปร่างแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพียงพอเพื่อที่จะทำให้อนุภาคเหล่านั้นเกาะกันและเกิดพันธะระหว่างกันขึ้น ขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเตรียมวัสดุ การขึ้นรูป การเผา โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนจะอธิบายดังต่อไปนี้

1. การเตรียมวัสดุ

การเตรียมวัสดุในงานวิจัยนี้จะถูกเตรียมด้วยวิธีกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) วิธีกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเพราะเป็นวิธีการบดผสมแบบง่าย ๆ ของของแข็งของสารตัวอย่างตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมี 2 แบบ คือ แบบแห้ง และแบบเปียก ซึ่งใช้การบดผสมแบบลูกบอล (Ball milling) วิธีนี้เตรียมง่ายโดยการนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งมาชั่งน้ำหนักให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการแล้วนำมาบดผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียคือ ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ได้สารหยาบ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่และอาจมีสารประกอบรูปอื่นๆเจือปนอยู่ เจือปนจากสารตั้งต้นหรือจากชุดอุปกรณ์ในการบด สิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของสารที่ต้องการเตรียม โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้า

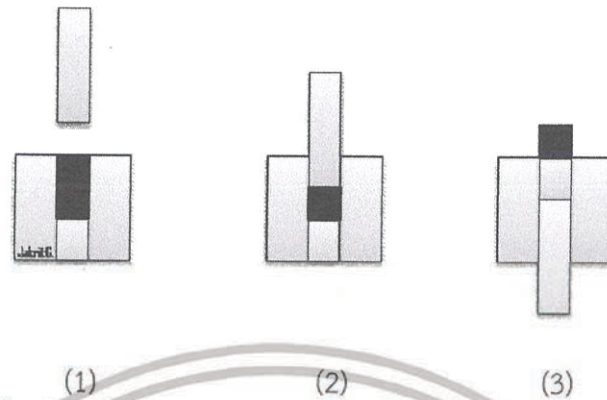
2. การขึ้นรูป

หลังจากที่เตรียมอนุภาคหรือผงของวัสดุแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการขึ้นรูปซึ่งการขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งในสภาวะที่แห้ง เหนียว นอกจากนี้ยังสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิสูง กระบวนการขึ้นรูปมีหลายประเภทด้วยกัน เช่น การอัด (Pressing) การหล่อแบบ (Casting) และกระบวนการอื่นๆนอกจากนี้ยังสามารถเติมสารตัวเติม (additive) เพื่อช่วยในการขึ้นรูปดีขึ้นยกตัวอย่างเช่น ผสม binder ลงในวัสดุที่เป็นผง เพื่อช่วยการยึดเกาะในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

- การอัด (Pressing)

วัสดุในรูปของผง (Powder) สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด (pressing) ทั้งในสภาวะแห้งหรือเหนียว กระบวนการอัดมีหลายประเภทด้วยกันแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการอัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การอัดแกนเดียว (uniaxial pressing) การอัดแกนเดียวเป็นกระบวนการอัดที่ง่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุด เริ่มต้นจากนำวัสดุใส่ลงในแม่แบบ จากนั้นให้แรงอัดในแนวเดียวเพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น ขั้นตอนสุดท้ายคือการถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยจะแสดงขั้นตอนการอัดแกนเดียว ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบอัดแกนเดียว (1) ใส่วัสดุลงในแม่แบบ (2) ให้แรงอัด (3) กดเพื่อถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ

สิ่งสำคัญที่จะช่วยทำให้ชิ้นงานที่ได้จากการอัดมีความหนาแน่นสูง คือ ขนาดของผงวัสดุ ถ้าเริ่มต้นจากผงที่มีขนาดเท่ากัน จะทำให้มีช่องว่างในชิ้นงานมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีรูพรุนสูงหรือมีความหนาแน่นน้อย เพื่อให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงควรผสมผงวัสดุที่มีขนาดต่างกันเข้าด้วยกัน

3. การเผา Sintering

การเผาเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดย Sintering คือ กระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเกิดพันธะซึ่งกันและกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูงมาก แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ การแพร่ของอนุภาคจะเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าผิวสัมผัสของอนุภาค

2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

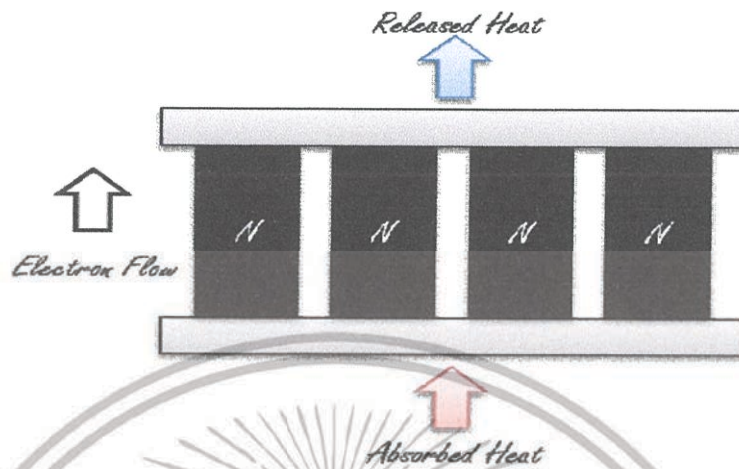
เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจัดเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น (Thermoelectric Cooler) หรืออาจถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Thermoelectric Generator) ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้น ตามหลักการจะเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่สูงหรือมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก ซึ่งคือวัสดุประเภทโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมาก มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำเป็นสื่อที่นำที่ตีได้เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยการเปลี่ยนคืนเป็นความร้อน ปัจจุบันเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นยังถือว่ามีประสิทธิภาพ (efficiency) ที่ต่ำมาก และถือว่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากความร้อนทั้งหมด แต่เนื่องจากมีข้อเด่นในเรื่องของขนาดที่เล็กมากและไม่มีชิ้นส่วนขยับทำให้ปราศจากมลพิษทางเสียง จึงได้มีกลุ่มวิจัยส่วนหนึ่งยังคงศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น

2.5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ลักษณะการเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำ หากต้องการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาใช้ในการทำความเย็นหรือความร้อน การนำสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นหลายตัวมาต่อขนานกันนั้นก็ทำได้ง่าย

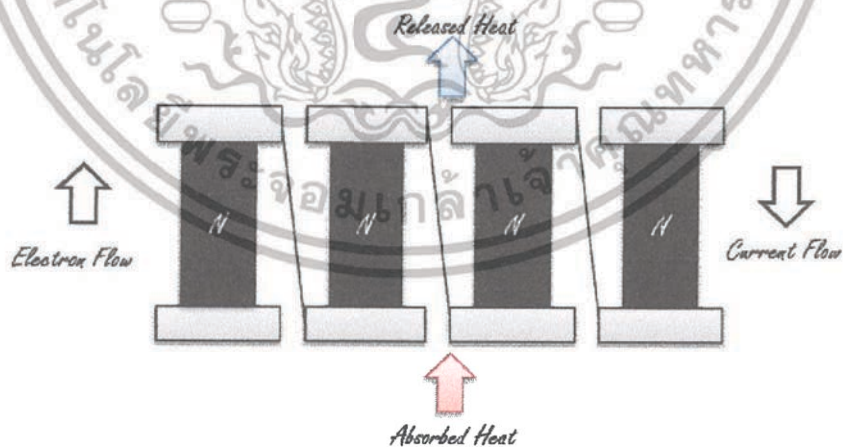
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ดังรูปที่ 2.6 การไหลและทิศทางของด้านร้อนและด้านเย็นก็สามารถที่จะควบคุมได้ง่าย แต่ด้วยข้อจำกัดที่ว่า สารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.6 แสดงการเชื่อมต่อของวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ต่อขานานกันสามารถควบคุมทิศทางของด้านความเย็นและความร้อนได้ แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ

ดังนั้นหากต้องการให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ตามต้องการ จึงต้องมีการนำวัสดุกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นหลายๆ ชุดมาต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.7 แต่ข้อเสียของการนำวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายๆ ตัวมาต่อกันนั้นจะยากในการควบคุมทิศทางของด้านร้อนและด้านเย็น ความร้อนส่วนหนึ่งจะไหลย้อนกลับมาทางด้านเย็นตามสายต่อระหว่างประจุบวกและประจุลบของวัสดุกึ่งตัวนำหรือเรียกว่าการลัดวงจรของความร้อนซึ่งเป็นการยากที่จะป้องกันการไหลย้อนกลับของความร้อน



รูปที่ 2.7 แสดงการเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นต่ออนุกรมกันสามารถเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ตามต้องการแต่ความร้อนจากด้านร้อนจะไหลย้อนกลับมาด้านความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นและแบบชนิดพี จะมีลักษณะการต่อเป็นคู่ๆ แบบอนุกรมและแบบขนาน โดยทางด้านไฟฟ้าเป็นการต่อแบบอนุกรม เพื่อให้ได้ขนาดของพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความต้องการ ส่วนการทำความเย็นและความร้อนเป็นการเชื่อมต่อแบบขนานเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำความเย็นให้ดีขึ้น

2.6 คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology) [7] [8]

2.6.1 นิยามของคอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุอันได้แก่ หินทรายหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

2.6.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้มาผสมกัน จะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)
- ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)
- มอร์ต้า ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)

2.6.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

1. ซีเมนต์เพสต์ หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์ คือ เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ โดยที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ คุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2. มวลรวม หน้าที่ของมวลรวม คือ เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ และช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมคือ ต้องมีความแข็งแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และต้านทานต่อแรงกระทบ

3. น้ำ หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีต มี 3 ประการ คือ ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ ใช้ผสมทำคอนกรีต ใช้บ่มคอนกรีต โดยที่หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 3 ประการ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ และทำหน้าที่ เคลือบหิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

4. น้ำยาผสมคอนกรีต หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่างๆ เช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถเทได้ กำลังอัด ความทนทาน เป็นต้น

2.6.4 ข้อดีและข้อเสียของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างมากตั้งแต่อดีตเนื่องจากความสามารถในการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่การนำคอนกรีตไปใช้งานต้องคำนึงถึงข้อจำกัดบางประการด้วย โดยในที่นี้จะบอกถึงข้อดีเปรียบและข้อเสียเปรียบของคอนกรีตอย่างคร่าวๆ เช่น ข้อดีเปรียบของคอนกรีต คือ สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้ ราคาถูก มีความทนทานสูง ทนไฟได้ดี ไม่ไหม้ไฟ สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง สามารถทำให้ผิวสวยงามได้ ส่วนข้อเสียเปรียบของคอนกรีต คือ ความสามารถรับแรงดึงต่ำ มีความยึดตัวต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ

2.6.5 วัสดุผสมคอนกรีต

1. ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนต่างๆ จนรวมตัวกันพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวมานี้หมายถึงปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่ผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นี้ มีปฏิกิริยากันเรียกว่าไฮเดรชัน (Hydration)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ นี้เกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ 1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง เกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

2. มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม คือ วัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยว่าทำไมคุณภาพของมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในเรื่องนี้อย่างมาก ในอดีต มวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสาน โดยกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เฟสเท่านั้น ในปัจจุบันนี้ พบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีก ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะ เพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย

3. น้ำ (Water)

ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยสิ่งเจือปนต่างๆในน้ำอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น เวลาการแข็งตัว กำลังอัด ทำให้สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้การเลือกน้ำที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับผสมและบ่มคอนกรีตจึงจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ

4. สารเคมีผสมเพิ่ม (Admixture)

สารเคมีผสมเพิ่ม หมายถึง สารอื่นๆนอกจากซีเมนต์ วัสดุผสมและน้ำ ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อช่วยปรับปรุงเนื้อคอนกรีตให้ดีขึ้นและได้ผลตามวัตถุประสงค์ตามต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีผสมเพิ่มนี้มีทั้งชนิดน้ำยาเคมีและชนิดผงเคมี ถ้าเป็นชนิดที่ละลายน้ำได้ควรผสมกับน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต เพราะผสมได้ทั่วถึงและควบคุมปริมาณให้สม่ำเสมอได้สะดวกกว่า สารเคมีผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้

- สารเร่งการก่อตัว (Accerator)

สารชนิดนี้จะทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นกว่าปกติ และทำให้มีกำลังอัดประลัยในระยะแรกสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องการถอดแบบได้เร็วและให้กำลังอัดประลัยได้เร็วกว่าปกติ เช่น การทำเสาเข็มธรรมดา เสาคอนกรีตอัดแรง

- สารหน่วงการก่อตัว (Retarder)

สารชนิดนี้มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตก่อตัวช้ากว่าธรรมดาสำหรับใช้ในกรณีที่ต้องขนส่งคอนกรีตผสมเสร็จในระยะทางไกลๆ

- สารกระจายกักฟองอากาศ (Air-entraining Admixtures)

สารชนิดนี้เมื่อผสมร่วมกับคอนกรีตจะทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต แต่ฟองนี้จะไม่ทะลุถึงกันได้ สารชนิดนี้ช่วยลดการสูญเสีย น้ำของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ แน่น ไม่ร้าวซึม รวมทั้งเพิ่มความต้านทานซัลเฟตด้วย

- สารลดปริมาณน้ำ (Water-reducing Admixture)

สารชนิดนี้จะช่วยลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าๆกันเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้น้ำน้อยลงจึงมีผลในทางเพิ่มกำลังของคอนกรีต

- สารขี้ปูนและทึบน้ำ

สารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline Silicates) จะทำให้คอนกรีตทึบน้ำแน่นกันน้ำไม่ให้ผ่านไปได้

2.6.6 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

นิยามของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างผนังและพื้น ด้วยคุณสมบัติพิเศษที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นน้อยและมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงและกำลังอัดประลัยสูงกว่าอิฐมวลเบาและคอนกรีตบล็อกทั่วไป 2-4 เท่า

ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา มีหลายประเภทแบ่งตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ และกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแตกต่างกัน คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปอาจแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. คอนกรีตมวลเบาชนิดทำฉนวน (Insulating Lightweight Concrete) มีความหนาแน่น ตั้งแต่ 315-1,100 kg/m³ และมีกำลังอัดประลัยที่การบ่มน้ำ 28 วัน ระหว่าง 7-70 kg/cm²

2. คอนกรีตมวลเบาชนิดใช้เป็นโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) มีความหนาแน่น 1,400-1,800 kg/m³ และมีกำลังอัดประลัยที่การบ่มน้ำ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 7-70 kg/cm²

3. คอนกรีตมวลเบาชนิดกึ่งเบา (Semi-Lightweight Concrete) มีความหนาแน่น 1,800-2,050 kg/m³ และมีกำลังอัดประลัยที่การบ่มน้ำ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 120 kg/cm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตชนิดใหม่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินทราย ปูนขาว ยิบซั่ม น้ำ และสารกระจายฟองอากาศ ส่วนผสมพิเศษในอัตราส่วนที่เป็นสูตรเฉพาะ ตัวอย่างส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาซึ่งผลิตโดย บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชันโปรดักส์ จำกัด ประกอบด้วยทรายละเอียดร้อยละ 50 ยิบซั่มร้อยละ 9 ปูนขาวร้อยละ 9 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ผงอลูมิเนียมร้อยละ 2 กระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแตกต่างกันด้วย

1. การผลิตแบบไม่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-autoclaved System) การผลิตวิธีนี้เป็นกรรมวิธีที่เตรียมไว้มาพร้อมด้วยตะแกรงคัดขนาดเพื่อแยกส่วนหยาบออก คลุกเคล้าส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัสดุแต่ละชนิดที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมคลุกเคล้าผสมทั้งหมด จากนั้นเติมน้ำลงไปคลุกเคล้าเป็นลำดับสุดท้าย คลุกเคล้าต่อไปกระทั่งส่วนผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน นำวัสดุไปอัดเป็นรูปตามขนาดที่ต้องการ หลังจากถอดแบบพิมพ์ให้ตากลมทิ้งไว้ประมาณ 3 วัน คอนกรีตมวลเบาที่ได้จะแห้งสนิทสามารถนำไปใช้งานได้ แบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุที่เบากว่ามาทดแทน เช่น เศษไม้ ถ่าน ชานอ้อย เม็ดโฟม ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยลง แต่จะมีอายุการใช้งานสั้น เป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยหากเกิดอัคคีไฟ

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Circular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟูและทิ้งให้แข็งตัว คอนกรีตประเภทนี้จะมีคราบคราบน้ำมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย รับกำลังอัดประลัยได้น้อย

2. การผลิตแบบผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) การผลิตวิธีนี้เป็นกรรมวิธีนำวัตถุดิบหลักคือ หินทราย มาบดด้วยเครื่องบดแล้วผสมกับน้ำ นำวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ปูนขาว ผงอลูมิเนียม หินทราย ซีเมนต์ ยิบซั่ม ผสมเข้ากันตามอัตราส่วนด้วยเครื่องผสม ในการผสม (Mixing) นำทรายและยิบซั่มมาผสมกันก่อน ในขณะเดียวกันปูนขาวผสมกับซีเมนต์ จากนั้นจึงนำทั้งหมดมาผสมกันและจึงผสมกับอลูมิเนียม เทเข้าแม่พิมพ์แล้วนำเข้าห้องบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นฟองอากาศและฟูขึ้นมา นำเข้าเครื่องตัดและเครื่องทำโครงตาข่าย นำผ่านเข้าเครื่องอบโดยสายพานลำเลียง ซึ่งแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาว ซึ่งควบคุมคุณภาพได้ยากมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ มีการดูดซึมน้ำ (Absorption) มากกว่า

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นระบบที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีต มีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดการตกผลึกแคลเซียมซิลิเกตในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงทนทานกว่าการผลิตในระบบอื่น

2.7 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

การเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงฟอสซิลเชื้อเพลิงชีวมวลหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นต้นไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้ความร้อนสำหรับจักรกลไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าการใช้ความร้อนเพื่อแปรรูปโลหะการสันดาปเครื่องยนต์การเผาขยะในระบบปิดและการทำความเย็นแบบ Absorption เป็นต้นพบว่าประสิทธิภาพของการนำความร้อนจากแหล่งพลังงานดังกล่าวไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นหน้าใบใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์นั้นทำได้เพียง 30%-40% เท่านั้นความร้อนส่วนเกินต้องทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระบายความร้อนซึ่งต้องสูญเสียพลังงานไป 60%-70% เนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพคาร์บอนในการแปรผันพลังงานตามวัฏจักรคาร์บอน เรียกรวมที่มักก่อประโยชน์นี้ว่าความร้อนเหลือทิ้งกระบวนการแปรรูปพลังงานความร้อน และเกิดความร้อนเหลือทิ้ง

2.7.1 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

ความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งกำเนิดความร้อนขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมโลหะและโรงเผาขยะนับเป็นแหล่งความร้อนเกรดสูง (high grade source) มีอุณหภูมิมากกว่า 650°C ส่วนโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า และความร้อนจากปล่องไอเสียเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิปานกลางประมาณ 120°-650°C ขณะที่ความร้อนจากการหุงต้มหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ใช้ไอน้ำแรงดันต่ำจะเป็นความร้อนเกรดต่ำ (low grade source) มีอุณหภูมิสูงในช่วง 60°-120°C โดย ประมาณดังแสดง ข้อมูลเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งประเภทต่างๆในตารางที่ 2.2 ,2.3 และ 2.4 ซึ่งความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับมาคืนใช้ได้แทนที่จะทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์อีกประการหนึ่งลักษณะของความร้อนเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากจึงสามารถนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนเพื่อคืนกลับพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอันจะช่วยให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 2.2 แสดงระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง

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

ตารางที่ 2.3 แสดงระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ

Type of device	Temperature, °C	Temperature, °F
Process steam condensate	54 - 88	130 - 190
Furnace	32 - 55	90 - 130
Bearing	32 - 88	90 - 190
Welding machines	32 - 88	90 - 190
Injection molding machines	32 - 88	90 - 190
Air compressor	27 - 49	80 - 120
Internal combustion engines	66 - 121	150 - 250
Air-cond, and refrig. condensers	62 - 43	90 - 110

2.8 หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [9]

การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ เรียกว่า driving force เช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าไหลเมื่อมีความต่างศักย์ ซึ่งเป็น driving force ที่ทำให้เกิดการไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนมีทิศทางแน่นอนขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว เรียกว่า เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางนั้นๆ ปัญหาของการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องในทางปฏิบัติแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ระบบที่กำหนดความแตกต่างมาเพื่อให้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนและการหาขนาดของระบบ เพื่อที่จะถ่ายเทความร้อนในอัตราของความแตกต่างอุณหภูมิที่กำหนดมาให้ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองร่วมกับการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณซึ่งขึ้นกับสมมติฐานที่นำมาใช้

การถ่ายเทความร้อนมีกลไก 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อน กลไกทั้ง 3 แบบจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ และความร้อนเคลื่อนที่จากอุณหภูมิสูง ไปยังอุณหภูมิต่ำ

การนำความร้อน (Heat conduction) คือ การถ่ายโอนพลังงานจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานมากกว่าไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่า เป็นผลของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นได้ในของแข็ง ของเหลว ก๊าซ การนำความร้อนในก๊าซและของเหลวเกิดเนื่องจากการชนกันและการแพร่ของโมเลกุลระหว่างการเคลื่อนที่แบบสุ่ม การนำความร้อนในของแข็งเกิดจากการรวมและการสั่นของโมเลกุลในโครงผลึกและการส่งผ่านพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระ อัตราของการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นกับ รูปทรงเรขาคณิตของตัวกลาง ความหนาของตัวกลางและชนิดของวัสดุที่เป็นตัวกลางรวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิตามขวางของตัวกลาง

การพาความร้อน (Heat convection) คือ การถ่ายโอนพลังงานเกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งไปยังของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ใกล้ผิวนั้นที่กำลังเคลื่อนที่ การถ่ายโอนการพาความร้อนได้มากหรือน้อยขึ้นกับการเคลื่อนที่ของของไหลเร็วหรือช้า ในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของก้อนของไหลใดๆ การถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลที่อยู่ใกล้ผิว จะเป็นการนำความร้อนอย่างเดียว (pure conduction) การพาความร้อนแบ่งเป็นการพาแบบถูกบังคับ (force convection) เมื่อของไหลถูกทำให้ไหลผ่านผิวโดยแรงจากภายนอก ได้แก่ พัดลม ปัม หรือ ลม และการพาความร้อนแบบ

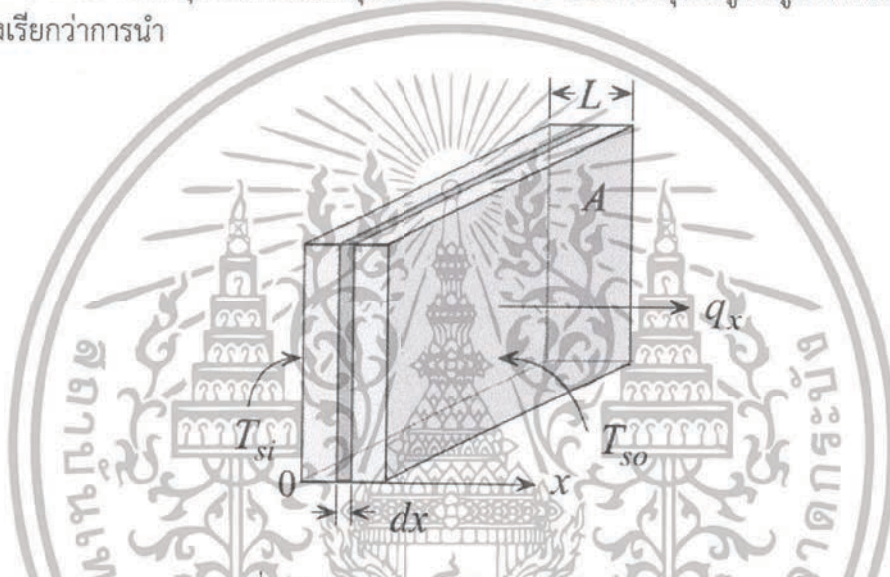
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปเซอร์ประโชชนดานการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติ (natural หรือ free convection) ซึ่งเกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเนื่องจากการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิในของไหล ทำให้เกิดความหนาแน่นแตกต่างกัน

การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) คือ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากสสาร (matter) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) หรือ โฟตอน (photon) เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางอะตอมหรือโมเลกุลต่างๆ การถ่ายโอนพลังงานโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และเกิดได้ในสุญญากาศ

Fourier's law conduction

แท่งโลหะแท่งหนึ่งเมื่อปลายแท่งด้านหนึ่งร้อนจะทำให้ปลายด้านอื่นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย การถ่ายเทพลังงานเช่นนี้เป็นผลมาจากการสั่นและการชนกันของโมเลกุลนั่นเองโดยทิศทางการชนและการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเป็นไปอย่างสุ่มซึ่งพลังงานจะถ่ายเทจากอุณหภูมิที่สูงกว่าไปยังอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งเรียกว่าการนำ



รูปที่ 2.8 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของการนำ

อัตราการถ่ายโอนความร้อนของการนำสามารถพิจารณาได้ง่ายๆจากรูปที่ 2.8 จากรูปที่ 2.8 เป็นรูปของกำแพงที่มีความหนา L บริเวณผิวด้านหน้าและด้านหลังไม่มีฉนวนความร้อนโดยที่ผิวด้าน $x = 0$ มีอุณหภูมิ T_{si} ส่วนผิวด้านหน้า $x = L$ มีอุณหภูมิเท่ากับ T_{so} โดยด้านขอบของกำแพงถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อน ดังนั้นความร้อนจึงถ่ายเทไปในทิศทางแกน X เท่านั้น สมมติว่าระบบนี้อยู่ในสภาวะคงตัว

Newton's law of cooling

การถ่ายเทความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งคือการพาซึ่งเกิดจากการที่ผิวของวัสดุและของไหลรอบๆผิวนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงาน พลักซ์ความร้อนที่ผิวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลต่างอุณหภูมิบริเวณผิวกับอุณหภูมิของของไหล

$$q_s'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

เมื่อ q_s'' คือ พลักซ์ความร้อนที่ผิว

T_s คือ อุณหภูมิบริเวณผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ไกลจากผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้รู้จักกันในนามของกฎการเยื้องตัวของนิวตัน โดย h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิต, คุณสมบัติของของไหล

2.9 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความต้านทานภายใน (R_{in}) ที่สมมูลกับโหลด (R_L) หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ โดยความต้านทานภายในหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_{in} = V_{oc} / I_{sc} \quad (2.13)$$

เมื่อ R_{in} คือ ความต้านทานภายในแหล่งจ่าย

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแหล่งจ่าย

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าปิดวงจรของแหล่งจ่าย

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P) มีค่าเท่ากับผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) กับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o) ดังสมการ (2.14)

$$P = V_o I_o \quad (2.14)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุตได้ดังนี้

$$I_o = (V_{oc} - V_o) / R_{in} \quad (2.15)$$

นำ (2.14) แทนลงใน (2.13) จะได้

$$v = k(z-1) \quad (2.16)$$

เมื่อ $R_L = R_{in}$ จึงได้ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{OPmax}) ดังนี้

$$V_{OPmax} = V_{oc} / 2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นสามารถเขียนกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$P_{MAX} = V_{oc}^2 / 4R_{in} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-ray Diffraction : XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive analysis) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะประกอบด้วย ข้อมูลของชุดค่า d-spacing และความเข้มของรังสีที่ตรวจจับได้ซึ่งสามารถนำไปใช้การคำนวณหา ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameters) โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) อย่างคร่าวๆ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ ขนาดของเกรน (Grain Size) และในบางกรณียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงของส่วนประกอบของโครงสร้าง (Texture Analysis) ได้อีกด้วย รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสงการดูดกลืน การกระเจิงแสงหรือการเลี้ยวเบนซึ่งปรากฏเหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างแต่ละชนิดเนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบเมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้น ความเข้ม (Intensity, I) ของรังสีเอกซ์ขึ้นกับกระแสไฟที่ใช้ (Current, i) ความต่างศักย์ (Voltage, V) และเลขอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า (Z) ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$I = kiZV^2 \quad (2.19)$$

ส่วนความถี่ของรังสีเอกซ์แบบเฉพาะจะเป็นฟังก์ชันกับเลขอะตอมตามกฎของมอสลีย์ (Moseley 's Law)

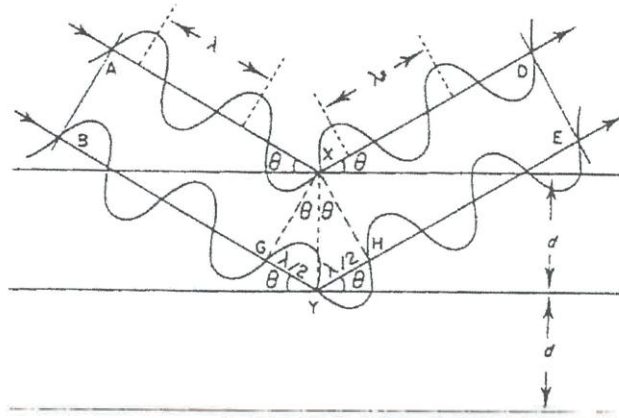
$$\nu = k(z-1)^2 \quad (2.20)$$

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็นสองชนิดคือสำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder X-ray Diffraction) และสำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single-Crystal X-ray Diffraction)

1. Powder X-ray Diffraction ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิด รังสีเอกซ์ Diffraction จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุสามารถบอกวิถุภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่าเป็นผลึกหรืออสัณฐานเทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิถุภาคของวัสดุได้

2. Single-Crystal X-ray Diffraction หรือ X-ray Crystallography สามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือสามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอมความยาวพันธะมุมระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้ คือสามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอมความยาวพันธะมุมระหว่าง 2 อะตอมในโมเลกุลได้เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้รังสีเอกซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

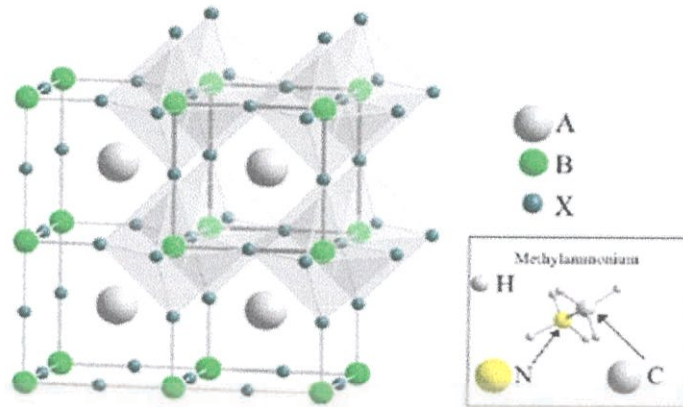
การเลี้ยวเบนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนขั้นตอนแรกคือการกระเจิง (scattering) ของรังสีตกกระทบซึ่งทำมุม θ กับผิวหน้าของของแข็งมุมของรังสีกระเจิงจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบซึ่งในแต่ละระนาบของโครงสร้างผลึกจะมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ขั้นตอนที่สองคือการเกิดการแทรกสอด (interference) ของรังสีกระเจิงที่เกิดขึ้นจากระนาบต่างๆถ้าการแทรกสอดเป็นแบบเสริม (Constructive interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นจากต่างระนาบตรงกันจะทำให้รังสีกระเจิงมีค่าสูงของคลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อนำฟิล์มมารองรับจะเห็นเป็นจุดสว่างใหญ่ขึ้นถ้าการแทรกสอดเป็นแบบหักล้าง (destructive interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นต่างเฟสกันรังสีกระเจิงจะมีค่าแอมพลิจูดลดลงถ้าฟิล์มมารองรับจะเห็นเป็นจุดที่เล็กกว่าหรือไม่เห็นเลยถ้าเกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถอธิบายโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg law)

2.11 โครงสร้างโครงผลึกของ CaMnO_3

Perovskites Structure : Perovskite เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกวัสดุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ ABX_3 (รูปที่ 2.10) โดยที่สารดังกล่าวมีโครงสร้างคล้าย CaTiO_3 ซึ่งค้นพบโดยครั้งแรกโดย Gustav Rose นักธรณีวิทยาชาวรัสเซีย และตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย ซึ่งในโครงสร้าง ABX_3 นั้น B คือไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb, Sn ในขณะที่ X คืออะตอมเฮไลต์ และ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง (ซึ่งอาจจะมาจากโลหะหรือสารไฮโดรคาร์บอน) ซึ่งวัสดุ perovskite ดังกล่าว มีมากมายกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์และแบบไฮบริด (มีการแทนที่ไอออนบวก หมู่ A ในสูตร ABX_3 ด้วยสารอินทรีย์) และมีสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น antiferromagnetic, piezoelectric, thermoelectric, semiconducting, conducting, และ superconducting

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ Face-center cubic closed packing (FCC) โดยไอออนบวก A และออกซิเจนซึ่งเป็นไอออนลบ จะจัดเรียงโครงสร้างแบบ FCC ไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (octahedral site)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Perovskites Structure [6]

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 Park et al. (2007)

ได้ศึกษาองค์ประกอบของเปลือกไข่ ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction พบว่าในเปลือกไข่ธรรมชาติมีแคลเซียม (Ca) ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 91.94 และ ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 4.30 เมื่อนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการ Calcination เป็นเวลา 2 ชม. ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 650°C ถึงอุณหภูมิ 770°C เพื่อจำกัดสารอินทรีย์และความชื้นในเปลือกไข่ รวมทั้งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปสารประกอบในโครงสร้างเปลือกไข่จากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination แล้ว แคลเซียมในเปลือกไข่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่านั้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99.63

2.12.2 Kittisakchai et al.

ได้ศึกษาและวิเคราะห์เปลือกไข่เป็ด โดยนำเปลือกไข่เป็ดที่บดเป็นผงและเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200°C ถึง 900°C เป็นเวลา 1 ชม. ตัวอย่างถูกศึกษาด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่า ตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและตัวอย่างที่เผาจนถึงอุณหภูมิ 600°C มีเฟสเป็นแคลไซต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700°C เฟสของแคลไซต์ลดลงในขณะที่มีเฟสใหม่ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เกิดขึ้น และสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700°C ถึง 900°C

2.12.3 Tosawat et al. (2014)

ได้สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 12 คู่ P- $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/\text{N-CaMnO}_3$ ขนาด $0.5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ โดยทำจากวัสดุราคาถูก ใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเชอรี่ ในการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และฐานเป็นเซรามิกส์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 473 K ผลต่างอุณหภูมิ 200 K และค่าความต้านทานภายนอก (R_L) เท่ากับ $0.1\text{-}0.75 \text{ k}\Omega$ ได้ Output Voltage (V_o) เท่ากับ 0.8 V , Output Current (I_o) เท่ากับ 2.46 mA กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) = 1.98 mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้เป็นการนำเสนอการดำเนินการวิจัยโดยจะอธิบายเกี่ยวกับ

3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เปลือกไข่ไก่ (โรงอาหารใหม่ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ)

3.1.2 ผงแมงกานีสไดออกไซด์ : MnO_2 (reagent grade 99.0%) ผลิตโดยบริษัท HiMedia Laboratories Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย

3.1.3 คอนกรีตทนไฟ Cast 15 LW ผลิตโดยบริษัท Siam Refractory Industry Co., LTD.

3.1.4 LITE MORTAR (W) ผลิตโดยบริษัท Siam Refractory Industry Co., LTD.

3.1.5 น้ำกลั่นและน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.1.6 แอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 %

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 บล็อกสำหรับอัดสารแบบรูปทรงกระบอก (ได้สารรูปทรงกระบอกพื้นที่หน้าตัด10mm)

3.2.2 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น Pioneer ผลิตโดยบริษัท OHAU ประเทศ สหรัฐอเมริกา

3.2.3 ภาชนะสำหรับเผาสาร ได้แก่ ถ้วยอลูมินา (Alumina crucible) ปริมาตร 50 ml และ กระบะอลูมินา (Alumina crucible boat) ขนาด 350X65X20 mm

3.2.4 เครื่องแก้ว ได้แก่ บีกเกอร์ขนาด 1000 ml

3.2.5 เตาเผาสาร ผลิตโดยบริษัท VESSTER ประเทศอังกฤษ

3.2.6 เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น C-MAG HS7 ผลิตโดยบริษัท IKA ประเทศจีน

3.2.7 ตู้บดสารอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมันนี

3.2.8 เครื่องผสมสาร (Ball milling)

3.2.9 Induction Heat 3Ph 10 KW 300V ผลิตโดยบริษัท Induction Heat.Co., LTD.

3.2.10 แท่นเจาะสว่าน REXON รุ่น SE-330B ประเทศไต้หวัน

3.2.11 เทอร์โมมิเตอร์ รุ่น UT 323

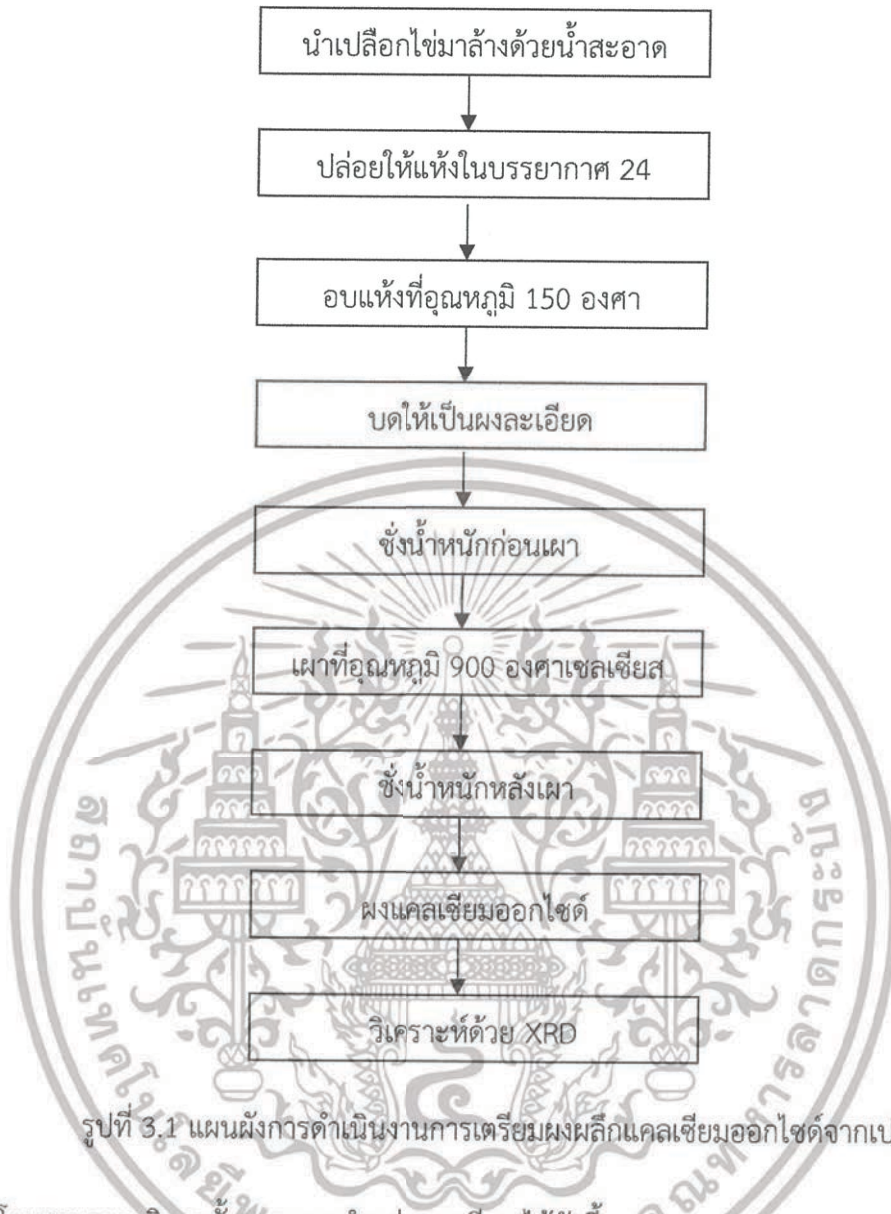
3.2.12 มัลติมิเตอร์ รุ่น Agilent 34461A ผลิตโดยบริษัท KEYSIGHT

3.2.13 แท่งอัดไฮดรอลิกขนาด 30 ตัน ผลิตโดยบริษัท KC HYDRAURIC

3.2.14 ครกบดสาร ชนิด Agate

3.3 การเตรียมผลึกแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ใช้เปลือกไข่โดยได้มาจาก โรงอาหาร ภายในคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น ขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานการเตรียมผงผลึกแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำอย่างละเอียด ได้ดังนี้

3.3.1 นำเปลือกไข่ไก่ที่ได้จาก โรงอาหาร ภายในคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง มาทำการคัดแยกเอาสิ่งปฏิกูลหรือสิ่งปนเปื้อนออกให้หมด และนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง โดยในขณะที่ทำการล้างด้วยน้ำสะอาดนั้นบริเวณภายในเปลือกไข่จะมีเยื่อหุ้มบางๆลักษณะสีขาว เราก้ลอกส่วนนั้นออกเพราะส่วนนั้นถือเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ



รูปที่ 3.2 เปลือกไข่ไก่หลังจากล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เมื่อล้างทำความสะอาดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการปล่อยให้แห้งในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง เพื่อให้เปลือกไข่แห้ง

3.3.3 นำเปลือกไข่อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ใช้อุณหภูมิ 150 °C ส่วนหนึ่งเพื่อไล่ความชื้นและอีกส่วนคือเป็นการป้องกันเวลานำเปลือกไข่ไปเผาที่อุณหภูมิใช้งานจะได้ไม่ส่งกลิ่นเหม็นขณะทำการเผา เนื่องจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ในเปลือกไข่

3.3.4 นำเปลือกไข่มาบดให้เป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ไม่ถึงกับบดละเอียดแล้วนำไปใส่ภาชนะเพื่อทำการเผา

3.3.5 นำเปลือกไข่ เข้าไปเผาในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

รูปที่ 3.3 เปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 900 °C

3.3.6 เมื่อเผาเสร็จแล้วนำมาบดให้ละเอียด และนำส่งตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างเพื่อยืนยันว่าเปลือกไข่ที่เราได้ทำการสังเคราะห์ มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

3.4 การสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ CaMnO_3 จากสารตั้งต้น CaO และ MnO_2 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction method)

3.4.1 เตรียมสารประกอบออกไซด์ CaMnO_3 โดยเริ่มจากการคำนวณปฏิกิริยาระหว่าง CaO และ MnO_2 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากัน ดังสมการที่ (3.1)



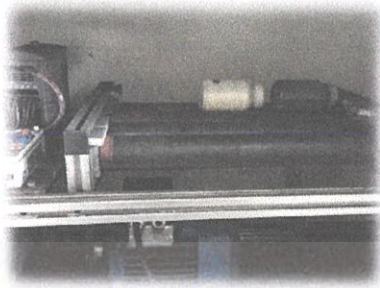
โดยทำการเตรียมสารตัวอย่าง 50 กรัม ปริมาณของสารแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ CaMnO_3

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ต้องใช้ (กรัม)
CaO	19.6074
MnO_2	30.3926

3.4.2 การผสมสารเข้าด้วยเครื่อง Ball mill สารตั้งต้นแต่ละชนิดหลังจากชั่งน้ำหนักได้ตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำสารตั้งต้นแต่ละชนิดมาทำการผสมเข้าด้วยกันซึ่งมีประโยชน์ในการเอกสารทำให้สารเคมีเป็นเนื้อเดียวกันก่อนทำการเผา การผสมนั้นผู้ผสมอยู่ในบรรยากาศของแอลกอฮอล์ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้เองหลังจากการบดผสมสารจึงต้องนำสารที่ได้ไปอบโดยมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้แอลกอฮอล์ระเหยออกจากตัวสารที่ผสมแล้วนั่นเอง



รูปที่ 3.4 การ Ballmill

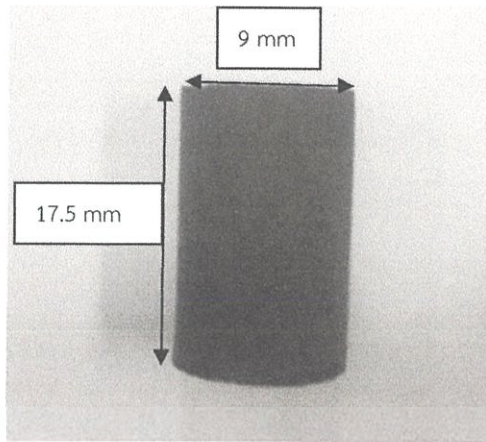
3.4.3 การเผาสาร การเผาสารเป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารเกิดการจัดเรียงตัว หรือจัดโครงสร้างใหม่ซึ่งการที่จะทำให้สารมีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม นับว่าอุณหภูมิมีบทบาทสำคัญในการจัดโครงสร้างของสาร จากการรีวิวเปเปอร์และลองผิดลองถูกจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญในการจัดเรียงโครงสร้างของสารคือระยะเวลาที่ใช้ในการเผา หากใช้เวลาในการเผานานสารจะสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นการเผาสารเพียงครั้งเดียวอาจไม่เพียงพอจึงมีเทคนิคการนำสารที่เผาแล้วมาทำการบดและนำไปเผาใหม่ซ้ำๆ อาจกล่าวสรุปได้ว่าวิธีดังกล่าวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสาร



รูปที่ 3.5 การเผาสาร

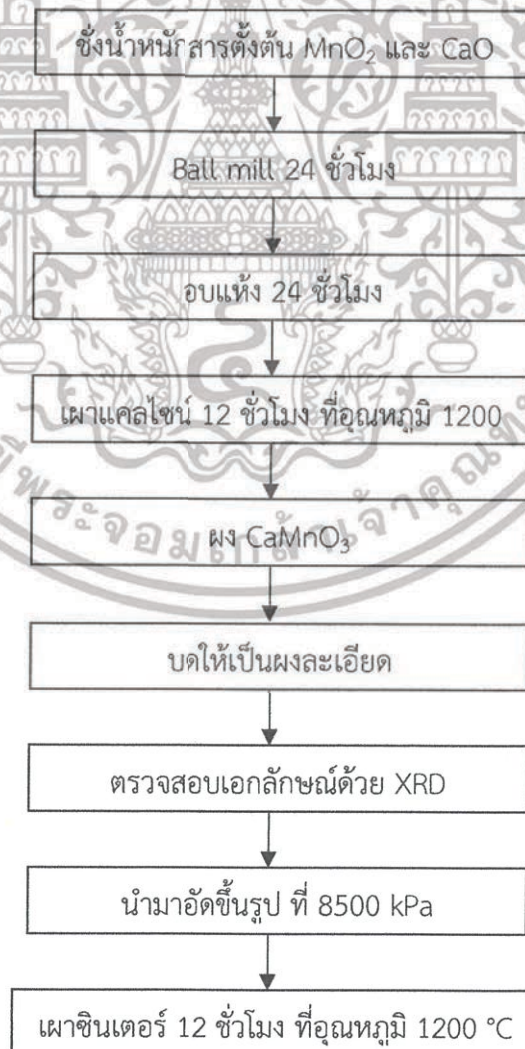
3.4.4 การอัดขึ้นรูปสารเทอร์โมอิเล็กทริก หลังจากการเผาสารจนได้โครงสร้างตามที่ต้องการแล้วนั้น นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอนการอัดหรือขึ้นรูป สำหรับความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปคือ 8500 kPa เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งการอัดขึ้นรูปแต่ละครั้งใช้สารหนัก 7 กรัม โดยมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm สูง 17.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก

3.4.5 การเผาแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก นำสารที่อัดขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกระบอกเข้าสู่กระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาทำให้อะตอมหรือโครงสร้างของสารยึดเกาะกันมากขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและทำให้ได้โครงสร้างที่ดีขึ้น เมื่อเผาเสร็จแล้วเราจะได้แท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกในขั้นตอนต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อ รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียมสาร CaMnO_3



รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียมสาร CaMnO_3

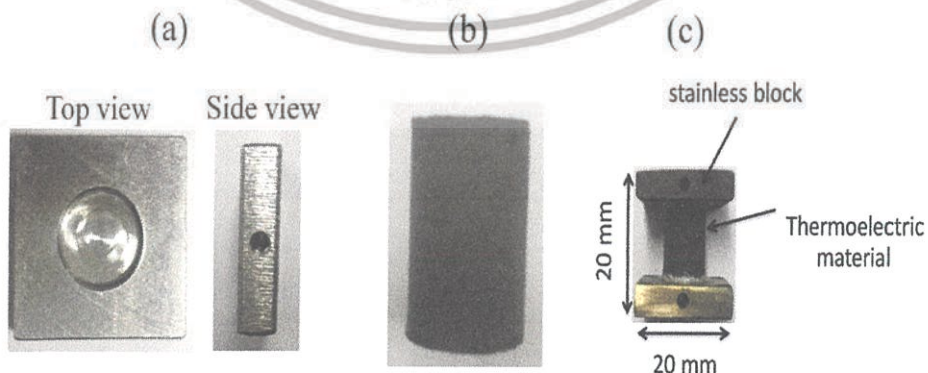
3.5 การออกแบบและสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล CaMnO_3

การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ได้ทำการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ให้มีความสูง 20 mm และกว้าง 20 mm โดยรูปแบบและลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีขั้นตอนหลายขั้นตอนด้วยกัน โดยขั้นตอนจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.9



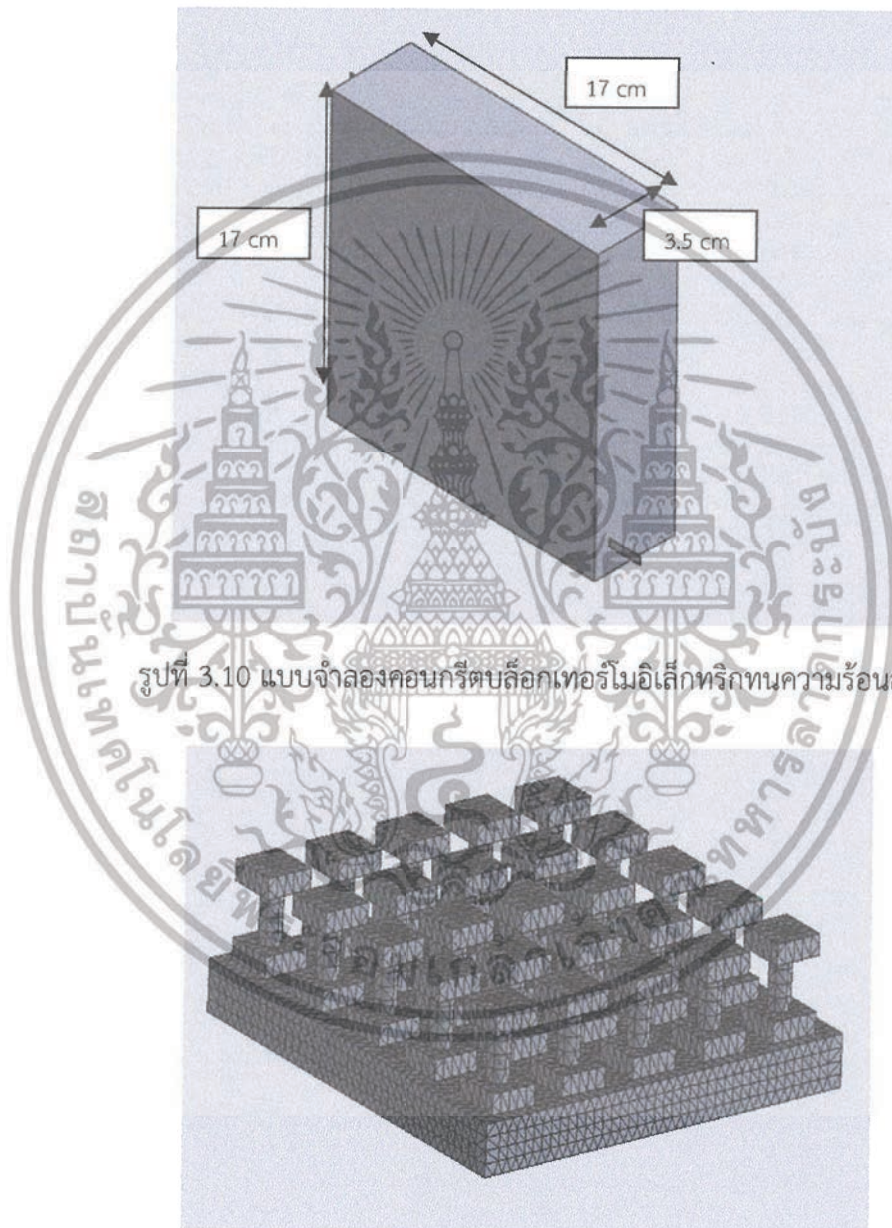
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล a) แผ่น stainless steel

b) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก CaMnO_3 c) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ขั้นตอนการออกแบบและทำคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

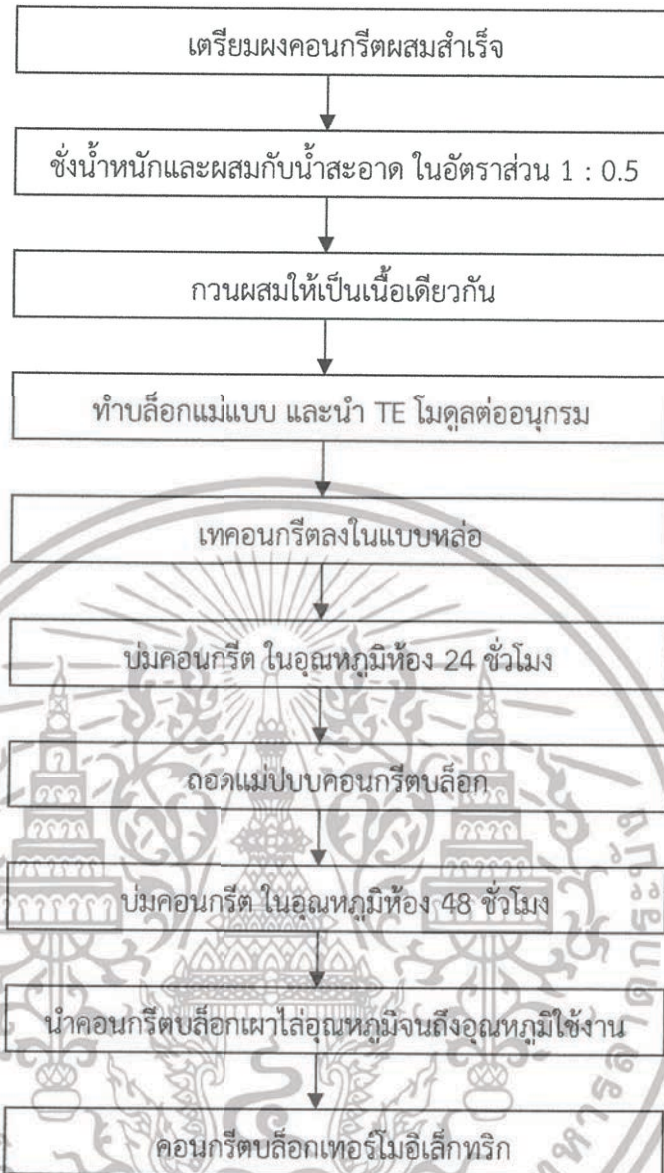
การออกแบบคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนและการสร้างผลต่างอุณหภูมิภายในตัวคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้หลักการนำความร้อนและพาความร้อนมาเป็นส่วนช่วยในการพิจารณาในการออกแบบ โดยได้ทำการออกแบบความยาวของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 17 เซนติเมตร ความกว้าง 17 เซนติเมตร และความหนา 3.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.10 แบบจำลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

รูปที่ 3.11 แบบจำลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการทำคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

3.6 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่ กับตัวแปรต่างๆ เช่น ผลต่างอุณหภูมิเทียบกับเวลา และค่าความต้านทานโหลดเป็นต้น และเพื่อบ่งบอกถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกอีกด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย 2 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง กับอุณหภูมิ, ศึกษาความสัมพันธ์อุณหภูมิด้านเย็นของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับอุณหภูมิด้านร้อน และ ศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจร กับผลต่างอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชุดการทดลองคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

3.6.2 ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่แหล่งความร้อน และ ด้านบนของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อทำการวัด T_H และ T_C

3.6.3 ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งความร้อน จากอุณหภูมิห้องถึง $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำการจดบันทึก T_H ที่อุณหภูมิ 30,100,150,200,250,300,350,400,450,500 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยจะทำการบันทึกค่า T_C ที่อุณหภูมิต่างๆ และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

3.6.4 คำนวณค่าของผลต่างอุณหภูมิ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

3.6.5 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เทียบกับอุณหภูมิ

3.6.6 วิเคราะห์กราฟและผลการทดลอง

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจรและผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ณ เวลาต่างๆ โดยให้อุณหภูมิคงที่

3.6.7 จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.13

3.6.8 ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่แหล่งความร้อน และ ด้านบนของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อทำการวัด T_H และ T_C

3.6.9 ทำการให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำการจดบันทึก ที่เวลา 10,30,50,70,90,110,130,150,170,190,210,230,250,270,290,310,330,350,370,390,410,430, 450,480 นาที ตามลำดับ โดยจะทำการบันทึกค่า T_C และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณค่าของผลต่างอุณหภูมิ ของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

3.6.10 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจร เทียบกับเวลา ที่ได้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็น 3.6.11 วิเคราะห์กราฟและผลการทดลอง ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

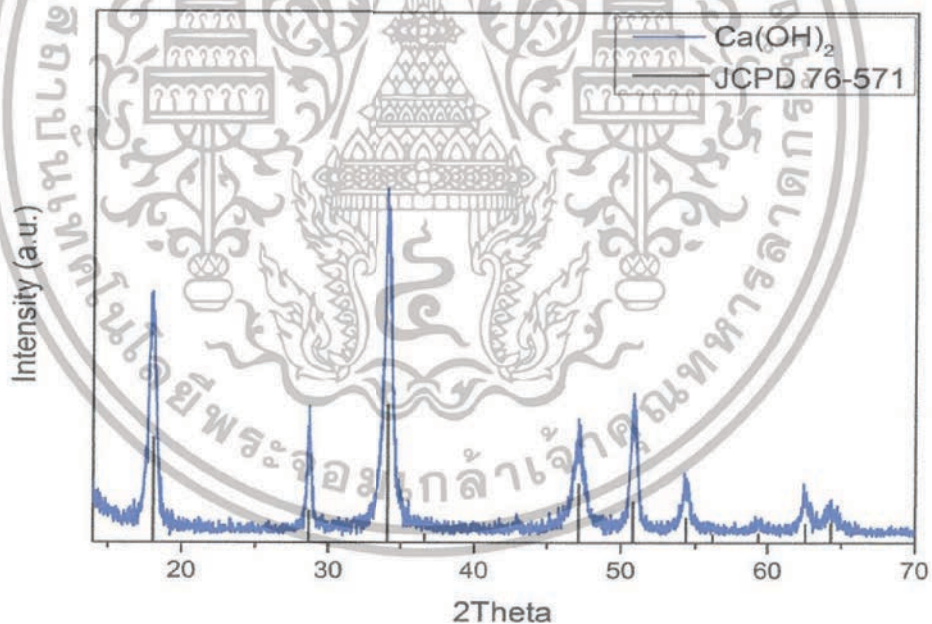
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในส่วนของบทที่ 4 นี้เป็นการเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลที่ได้จากการสังเคราะห์เปลือกไข่ไก่และการสังเคราะห์สารประกอบ CaMnO_3 รวมไปถึงผลของการทดลองของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่ โดยมีหัวข้อที่จะนำเสนอ ดังนี้

4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง (Structure properties)

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเปลือกไข่ไก่

เมื่อทำการเผาเปลือกไข่ไก่ ที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD ซึ่งพบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ Ca(OH)_2 ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 18.066, 28.676, 34.101, 47.144, 50.798, 54.356, 59.376, 62.606$ และ 64.300 องศา โดยที่ผลการเลี้ยวเบนทั้งหมดที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPD หมายเลข 76-571



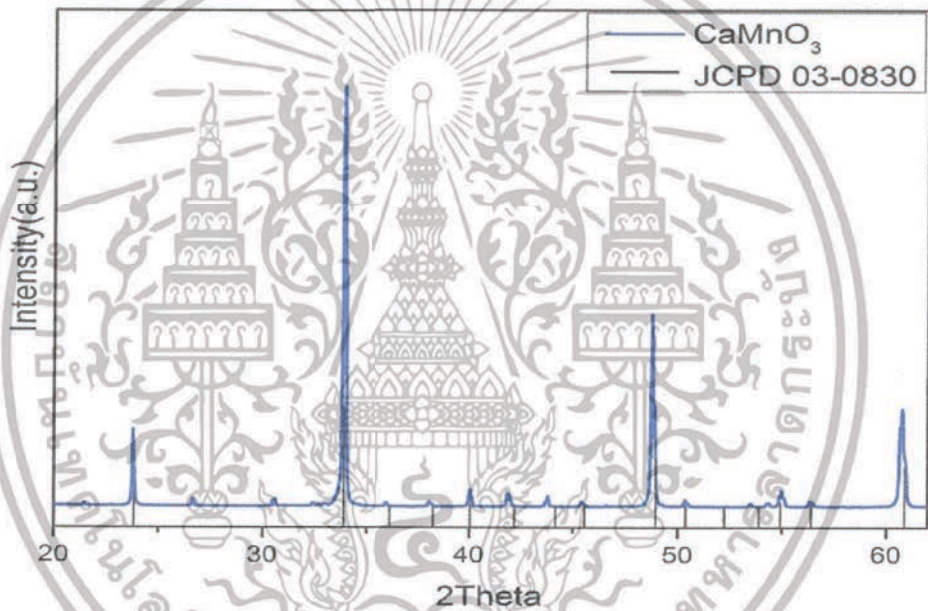
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่ไก่ ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง

จากกราฟ XRD พบว่าไม่พบเฟสของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่งานวิจัยนี้ต้องการ แต่พบเฟสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยได้ทำการเผาเปลือกไข่ไก่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้องค์ประกอบของเปลือกไข่ไก่ที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เปลี่ยนเฟสเป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แต่ผลจากการตรวจสอบเอกสารโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผากลับไม่เป็นไปตามที่ต้องการ สมมติฐานที่มีเหตุและมิ่งานวิจัยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับหรือทฤษฎีพื้นฐานที่จะสามารถอธิบายได้ เนื่องจากเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนต(CaCO_3) เปลี่ยนเฟสเป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แล้วนั้น CaO เป็นสารประกอบที่มีปฏิกิริยาที่ไวต่อความชื้นในอากาศมาก เมื่อมันทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ ก็จะทำให้เปลี่ยนเป็นเฟสของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บรักษาที่ไม่มิดชิดมากเพียงพอ

4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบ CaMnO_3

เมื่อทำการแคลไซน์สารตัวอย่าง ที่ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD ซึ่งพบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ CaMnO_3 ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 23.836, 33.928, 36.190, 38.268, 40.040, 42.193, 44.141, 15.545, 48.929, 50.373, 53.886, 54.935, 56.402$ และ 62.258 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนทั้งหมดที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPD หมายเลข 03-0830

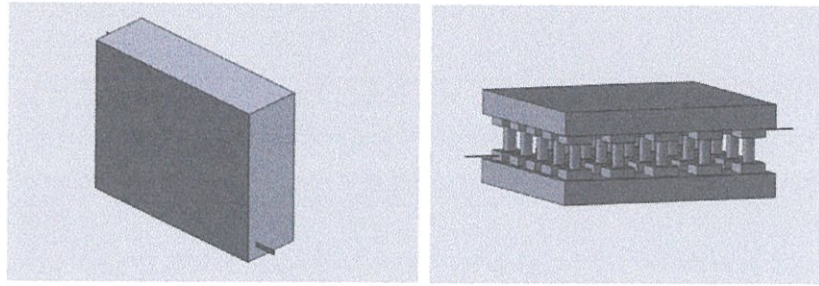


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CaMnO_3 แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

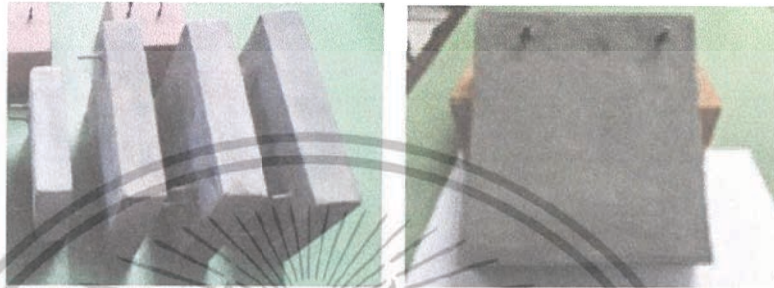
4.2 คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่

คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูงได้สร้างตามการออกแบบ โดยการสร้างคอนกรีตนั้นได้คัดเลือกวัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนที่ต่ำ มีราคาถูก ดังแสดงในรูปที่ 4.3



(a)



(b)

รูปที่ 4.3 (a) แบบจำลองคอนกรีตบล็อก (b) คอนกรีตบล็อกที่สร้าง

4.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่ กับอุณหภูมิ

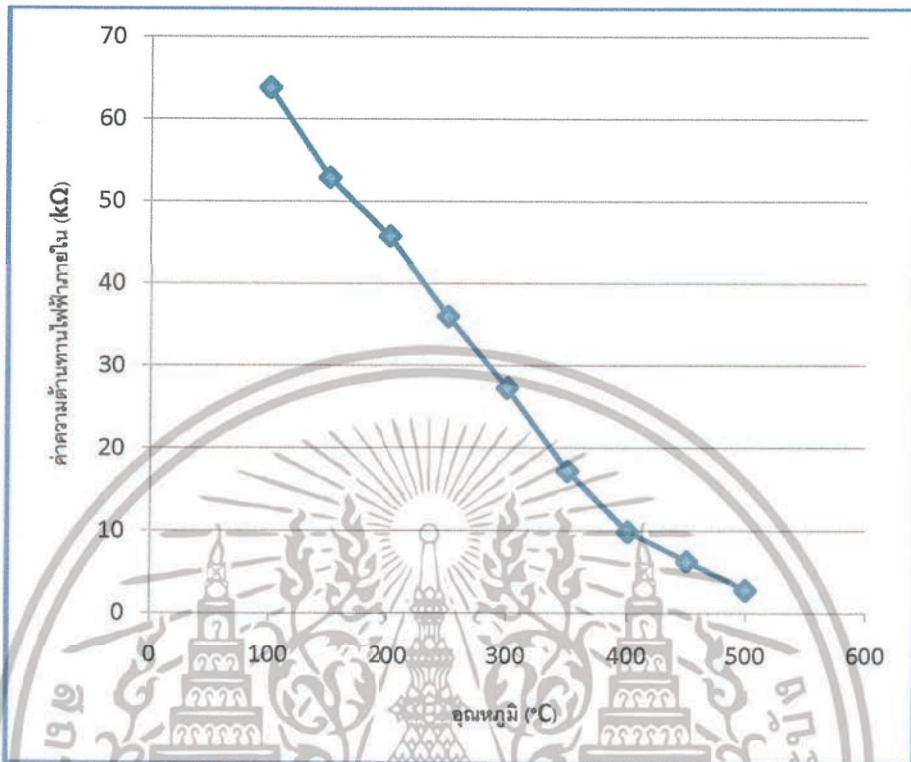
การทดลอง นี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะตัวของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นจากเปลือกไข่ไก่ ในด้านผลกระทบของอุณหภูมิต่อความต้านทานภายในของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ความต้านทานไฟฟ้าภายในหาได้จากผลการระหว่างไฟฟ้าเปิดวงจรกับกระแสไฟฟ้าปิดวงจร ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้กับโพลดเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับผลต่างอุณหภูมิในแต่ละค่า ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ระหว่าง R_{IN} กับ T

T_H (°C)	T_C (°C)	ΔT (°C)	I_{sc} (μA)	V_{oc} (V)	R_{IN} (kΩ)
100.0	25.3	74.7	0.919	0.058	63.796
150.0	26.5	123.5	3.196	0.169	52.878
200.0	27.3	172.7	6.142	0.281	45.750
250.0	28.1	221.9	13.647	0.491	35.978
300.0	31.0	269.0	25.718	0.702	27.296
350.0	33.2	316.8	55.395	0.953	17.203
400.0	34.4	365.6	121.473	1.202	9.895
450.0	49.8	400.2	218.537	1.382	6.323
500.0	78.3	421.7	530.427	1.487	2.803

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

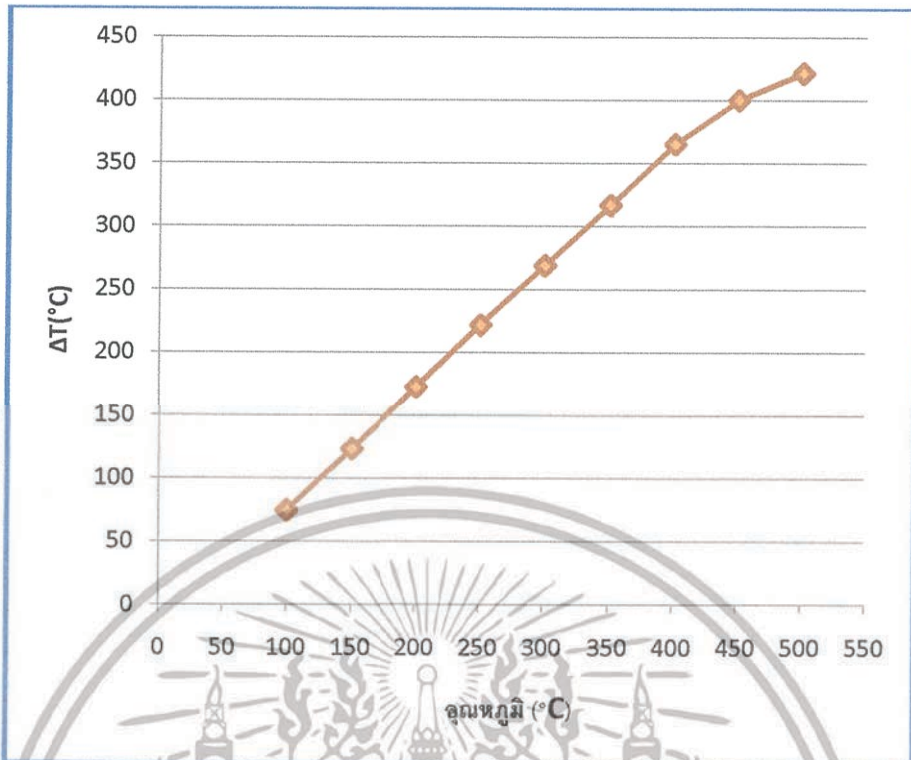
จากการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใน และอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับอุณหภูมิบ่งชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความต้านทานภายในของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะของกราฟมีความเป็นสมการเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้นด้วยผลกระทบจากอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ เพราะเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าดีขึ้นหรือก็คือค่าความต้านทานมีค่าลดลงตามอุณหภูมินั้นเอง ดังนั้นวัสดุที่เราได้ทำการสังเคราะห์นั้นแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ

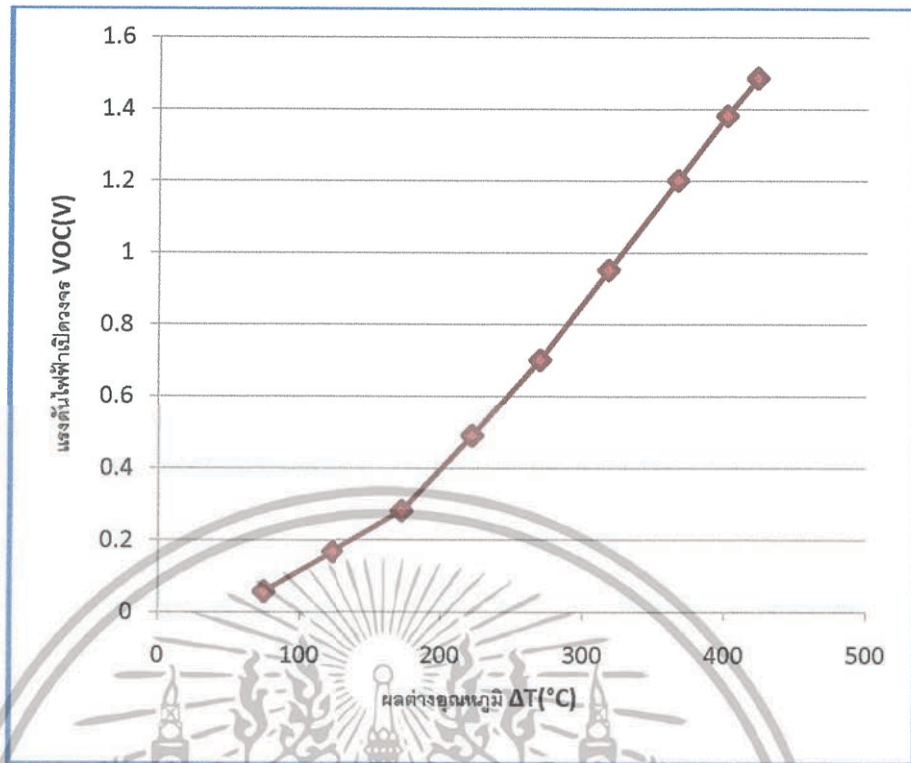
จากการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นผลต่างอุณหภูมิก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย นั่นเป็นเพราะว่าคอนกรีตที่ถูกสร้างขึ้นมามีค่าการนำความร้อนที่ต่ำทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิได้ และในการทดลองต่อไปเราจะทำการให้อุณหภูมิด้านร้อนคงที่ แล้วทำการศึกษาผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเวลา เพื่อศึกษาการสร้างผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

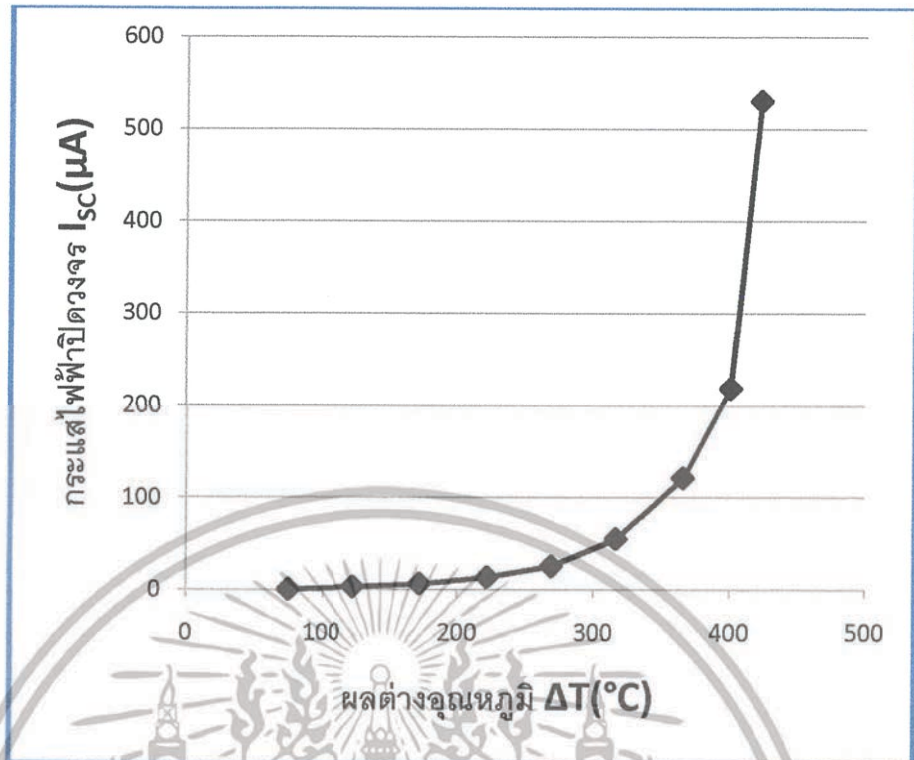
จากการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ เป็นไปตามหลักการของซีเบค ที่กล่าวว่า “เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ บริเวณรอยต่อของตัวนำสองชนิด จะเกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อวงจรปิด” โดยในกรณีนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของทั้งสองด้านไม่เท่ากันทำให้พาหะข้างมากที่ได้รับความร้อน จะถูกเร่งด้วยพลังงานจลน์ทำให้พาหะข้างมากเคลื่อนที่ไปยังฝั่งอุณหภูมิด้านเย็น และเมื่อพาหะในวัสดุ ไม่สมดุลทางไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ซึ่งจะมีค่าน้อย ขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิ โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของ คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ นั้นแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่า เพิ่มขึ้นตามผลต่างอุณหภูมิที่มีค่ามากขึ้น

จากการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าปิดวงจรของ คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับผลต่างอุณหภูมิ โดยตามหลักการของโอห์มกล่าวว่า กระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า โดยในกรณีของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนปะทะข้างมากเคลื่อนที่ไปยังฝั่งที่อุณหภูมิต่ำเมื่อมีการไหลของพาหะข้างมากจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในระบบ และเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นโดยจะมีทิศทางการไหลของกระแสขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจากกราฟก็แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลต่างอุณหภูมินี้มีผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้า

4.2.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจรและผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ณ เวลาต่างๆ โดยให้อุณหภูมิคงที่ 500 °C

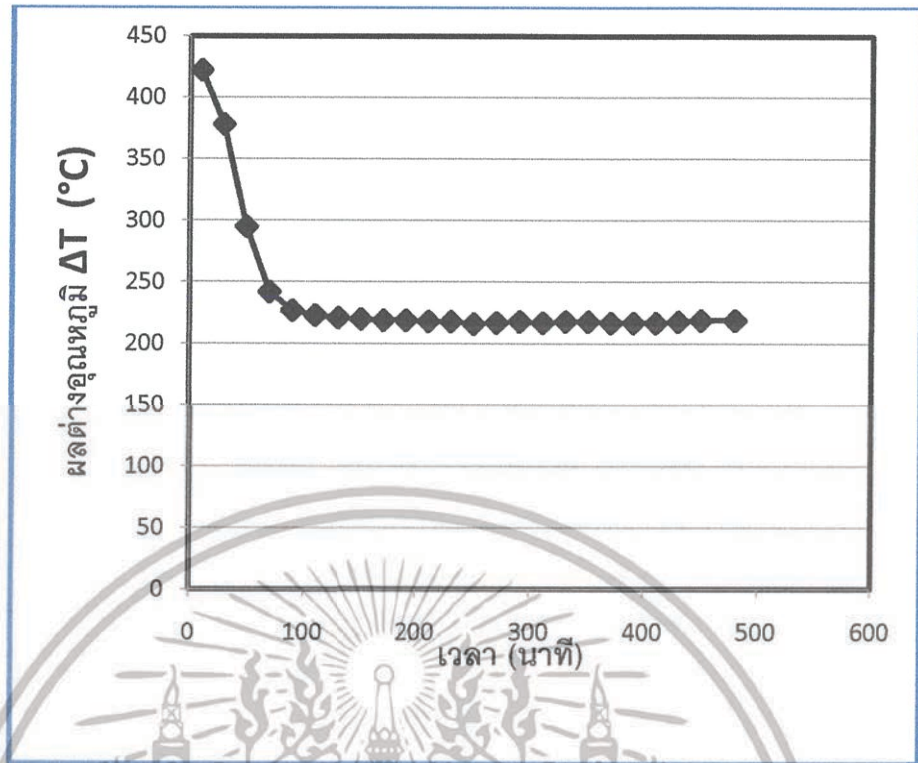
การทดลอง นี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะตัวของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ทนความร้อนสูง โดยใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่ ในด้านผลกระทบของเวลาใช้งานต่อผลต่างอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ทน โดยผลการทดลองและพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก

เวลา(นาที)	T_H (°C)	T_C (°C)	ΔT (°C)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)
10	500	78.3	421.7	0.530	1.487
30	500	122.9	377.1	1.086	1.328
50	500	205.1	294.9	1.516	0.816
70	500	258.0	242.0	1.165	0.691
90	500	273.5	226.5	1.106	0.590
110	500	277.6	222.4	1.114	0.589
130	500	279.8	220.2	1.116	0.588
150	500	280.0	220.0	1.190	0.546
170	500	281.0	219.0	1.187	0.557
190	500	281.0	219.0	1.154	0.577
210	500	282.0	218.0	1.065	0.580
230	500	282.8	217.2	1.178	0.582
250	500	284.0	216.0	1.247	0.610
270	500	283.0	217.0	1.518	0.621
290	500	282.0	218.0	1.545	0.641
310	500	283.0	217.0	1.558	0.643
330	500	282.3	217.7	1.518	0.662
350	500	282.4	217.6	1.580	0.678
370	500	283.3	216.7	1.612	0.685
390	500	283.1	216.9	1.637	0.690
410	500	283.5	216.5	1.638	0.697
430	500	282.5	217.5	1.669	0.702
450	500	281.6	218.4	1.637	0.704
480	500	281.3	218.7	1.672	0.702

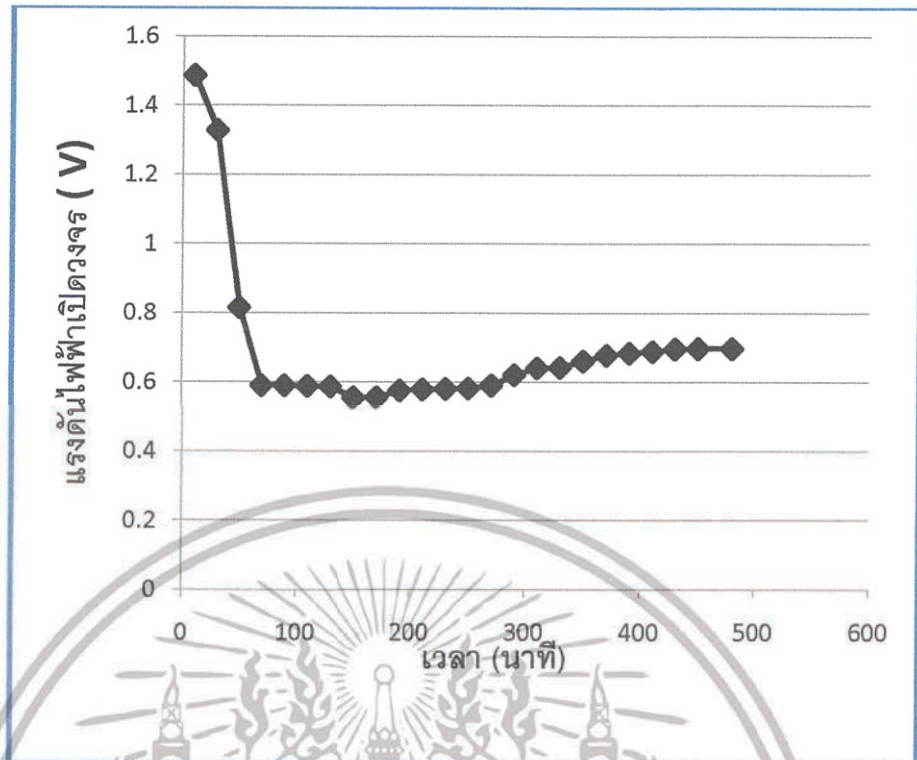
จากการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับเวลาดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



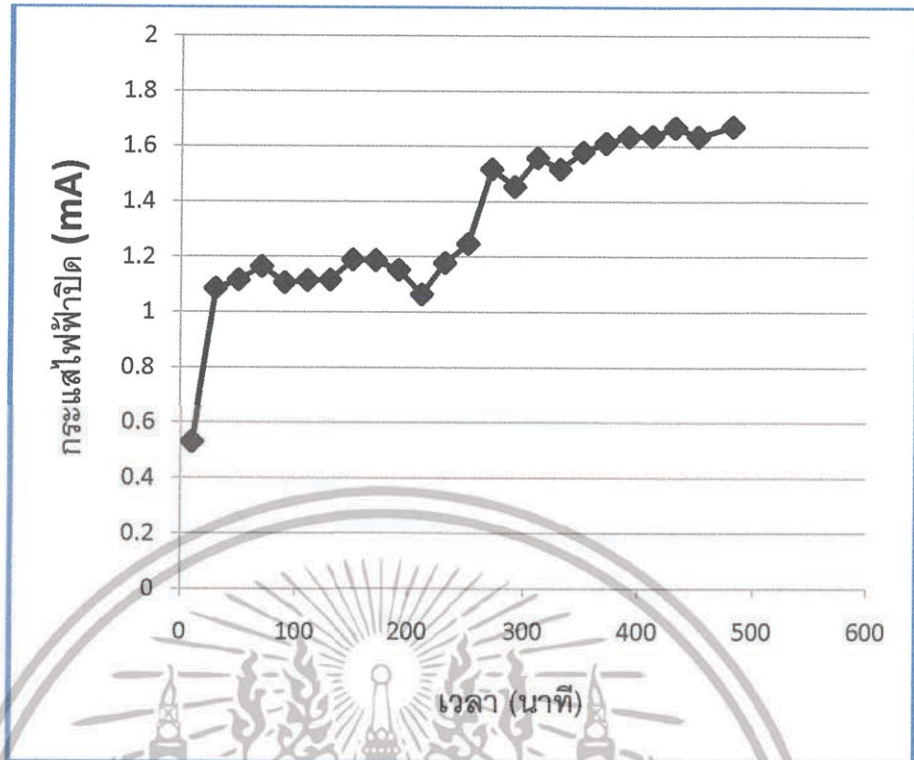
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับเวลา

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นว่าตัวคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถที่จะสร้างผลต่างอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ได้ที่อุณหภูมิประมาณ 210 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลาที่ 100 นาที เป็นต้นไป โดยจากผลการทดลองถือว่าเป็นสิ่งที่น่าพึงพอใจและเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อที่จะใช้แก้ปัญหาในการสร้างผลต่างอุณหภูมิเพราะผลต่างอุณหภูมิมิถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการใช้งานเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกในการนำมาใช้เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อน



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก กับเวลา

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เทียบกับเวลา โดยแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า ลักษณะของกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับผลต่างอุณหภูมินั้นมีลักษณะของกราฟ มีทิศทางไปในทางเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถที่จะสร้างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรให้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.6-0.7 V แบบคงที่ได้ โดยหากคำนึงถึงการนำไปใช้งานก็สามารถที่จะผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนได้อย่างคงที่



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกกับเวลา

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าปิดวงจรของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกกับเวลา กระแสไฟฟ้าปิดวงจรมีค่าอยู่ในช่วง 1-1.6 mA โดยค่ากระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่คงที่ แต่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้านั้นยังมีส่วนที่ยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้อยู่ในหลายส่วน เพราะในการอธิบายพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าต้องเข้าใจรูปแบบของค่าความต้านทานรอยต่อระหว่างโลหะกับวัสดุสารกึ่งตัวนำ ก็จะสามารถอธิบายได้ว่าทำไมกระแสถึงมีค่าไม่คงที่ แต่จากผลการทดลองก็ถือได้ว่ากระแสปิดวงจรที่คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสร้างได้นั้นมีค่าคงที่ เพราะการแกว่งนั้นมีค่าน้อยมาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่ เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก CaMnO_3 ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยเปลือกไข่ไก่จะถูกเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะถูกรวบรวมและวิเคราะห์โดยการวัดสมบัติเชิงโครงสร้างผลึก และการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก CaMnO_3 จะใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งจะถูกรวบรวมและวิเคราะห์โดยการวัดสมบัติเชิงโครงสร้างผลึก และเมื่อสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้แล้วจะถูกนำมาออกแบบและประยุกต์ใช้เป็นคนกริตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง ซึ่งหลักการการทำงานของคนกริตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกคือเมื่อได้รับความร้อนจะทำการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าได้โดยตรง โดยจะทำการศึกษาและทดลองคนกริตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยจะแสดงผลการตรวจสอบและทดลอง พร้อมด้วยข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางพัฒนาต่อไป โดยผลการตรวจสอบมีดังนี้

5.1.1 X-ray diffraction (XRD) เปลือกไข่ไก่ พบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ Ca(OH)_2 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ Hexagonal ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 18.066, 28.676, 34.101, 47.144, 50.798, 54.356, 59.376, 62.606$ และ 64.300 องศา โดยพิศการเลี้ยวเบนทั้งหมดที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPD หมายเลข 76-571 จากกราฟ XRD พบว่าไม่พบเฟสของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่งานวิจัยนี้ต้องการ แต่พบเฟสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยได้ทำการเผาเปลือกไข่ไก่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้องค์ประกอบของเปลือกไข่ไก่ที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เปลี่ยนเฟสเป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แต่ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผากลับไม่เป็นไปตามที่ต้องการ สมมติฐานที่มีเหตุผลและทีมงานวิจัยรองรับหรือทฤษฎีพื้นฐานที่จะสามารถอธิบายได้ เนื่องจากเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แล้วนั้น CaO เป็นสารประกอบที่มีปฏิกิริยาที่ไวต่อความชื้นในอากาศมาก เมื่อมันทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ ก็จะทำให้เปลี่ยนเป็นเฟสของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บรักษาที่ไม่มีมิดชิดมากเพียงพอ

5.1.2 X-ray diffraction (XRD) CaMnO_3 เมื่อทำการแคลไซน์สารตัวอย่าง ที่ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD ซึ่งพบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ CaMnO_3 ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 23.836, 33.928, 36.190, 38.268, 40.040, 42.193, 44.141, 15.545, 48.929, 50.373, 53.886, 54.935, 56.402$ และ 62.258 องศา โดยพิศการเลี้ยวเบนทั้งหมดที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPD หมายเลข 03-0830

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกทนความร้อนสูง

สร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ CaMnO_3 จำนวน 20 โมดูล ในขณะเดียวกันทำการออกแบบคอนกรีตบล็อกและการหล่อคอนกรีตเพื่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยได้ทำการออกแบบคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ขนาด $17 \times 17 \times 3.5$ เซนติเมตร เมื่อการออกแบบเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์และคัดสรรวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อสร้างคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเสร็จสมบูรณ์ หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏว่าคอนกรีตบล็อกสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ 1.487 โวลต์ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส และได้ทดลองให้ความร้อนแก่คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาว่าคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้ในตัวเองหรือไม่ จากการทดลองปรากฏว่า คอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้คงที่ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ตั้งแต่หลังให้ความร้อนผ่านไป 1 ชั่วโมง และคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าก็สามารถที่จะสร้างแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมาได้คงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการใช้สารตั้งต้นสกัดจากเปลือกไข่ไก่ นั้นจะยังได้สารตั้งต้นที่ยังไม่มีความบริสุทธิ์มากนัก และจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผันความร้อนเป็นไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งจากการทำงานวิจัยนี้ก็สามารถทำให้เราเข้าใจหลักการทำงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมากพอสมควร ถ้าหากต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกก็คงไม่ใช่เรื่องยาก หากแต่เพียงต้องการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากการใช้สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ และมีประสิทธิภาพสูง และที่ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของคอนกรีตบล็อกเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเพราะยังไม่มั่นใจในระบบว่าจะสามารถให้ค่ากำลังสูงสุดออกมาได้ถูกต้องตามหลักวิชาการ ดังนั้นจึงได้แสดงเพียงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าเปิดวงจรเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Molinari, D. A. Tompsett, S. Parker. Structural, electronic and thermoelectric behavior of CaMnO_3 . J. Mater. Cem. A, 2014, 2, 14109
- [2] Tsai, W.T., K.J. Hsien, H.C. Hsn, C.M. Lin, K.Y. Lin and C.H. chiu. 2008. Utilization of ground eggshell waste as an adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. Bioresource Technology. 99:1623-1629.
- [3] Park, H.J., Jeong, S.W., Yang, J.K., Kim, B.G., Lee, S.M. 2007. Removal of heavy metals using waste eggshell. Journal of Environmental Science 19, 1436-1441.
- [4] Stadelman, W.J., 2000. Eggs and egg products. In: Francis, F.J. (Ed.), Encyclopedia of Food Science and Technology, second ed. John Wiley and Sons, New York, pp. 593-599.
- [5] วรธนะ โกศลวัฒน์. 2558. “ผลกระทบของการนำแมงกานีสไปแทนที่โครเมียม ในสารประกอบเตลาฟอสไฟต์ CuCrO_2 ที่ส่งผลต่อค่าสภาพการนำความร้อน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชา ฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] เฉลิมพล รุจรตวงศ์. 2557. “ศึกษาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบเตลาฟอสไฟต์ $\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ($x=0.00-0.05$).” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชา ฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. CPAC 2542.
- [8] วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี 2544.
- [9] ผงศรี ดำรงค์ศักดิ์. Heat Transfer การถ่ายเทความร้อน. 2551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Removal of heavy metals using waste eggshell

PARK Heung Jai^{1,*}, JEONG Seong Wook¹, YANG Jae Kyu²,
KIM Boo Gil³, LEE Seung Mok⁴

1. School of Environmental Science and Engineering, Inje University, 621-749, 607, Gyungnam, Korea. E-mail: phjenv@yahoo.co.kr

2. Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

3. Division of Architecture and Civil Engineering, Dong-seo University, Busan, Korea

4. Department of Environment and Disaster Prevention, Kwandong University, Gangneung, Korea

Received 19 March 2007; revised 18 May 2007; accepted 27 June 2007

Abstract

The removal capacity of toxic heavy metals by the reused eggshell was studied. As a pretreatment process for the preparation of reused material from waste eggshell, calcination was performed in the furnace at 800°C for 2 h after crushing the dried waste eggshell. Calcination behavior, qualitative and quantitative elemental information, mineral type and surface characteristics before and after calcination of eggshell were examined by thermal gravimetric analysis (TGA), X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. After calcination, the major inorganic composition was identified as Ca (lime, 99.63%) and K, P and Sr were identified as minor components. When calcined eggshell was applied in the treatment of synthetic wastewater containing heavy metals, a complete removal of Cd as well as above 99% removal of Cr was observed after 10 min. Although the natural eggshell had some removal capacity of Cd and Cr, a complete removal was not accomplished even after 60 min due to quite slower removal rate. However, in contrast to Cd and Cr, an efficient removal of Pb was observed with the natural eggshell rather than the calcined eggshell. From the application of the calcined eggshell in the treatment of real electroplating wastewater, the calcined eggshell showed a promising removal capacity of heavy metal ions as well as had a good neutralization capacity in the treatment of strong acidic wastewater.

Key words: wasted eggshell; CaO; removal; heavy metals

Introduction

Industrial wastewater contaminated with heavy metals is commonly produced from many kinds of industrial processes. Therefore, if this wastewater is not treated with a suitable process or leaked from storage tanks, it can cause a serious environmental problem in the natural eco-system.

Whenever toxic heavy metals are exposed to the natural eco-system, accumulation of metal ions such as lead, cadmium and mercury in human body will be occurred through either direct intake or food chains (Yoo *et al.*, 2002). Therefore, heavy metal should be prevented before it reaches to the natural environments because of its toxicity.

In order to remove toxic heavy metals from water systems, several methods have been suggested and investigated. Although chemical precipitation, coagulation, ion exchange, solvent extraction, filtration, evaporation and membrane methods have been applied in this purpose, most techniques have some limitations such as requirement of several pre-treatments as well as additional treatments. In addition, some of them are less effective and require

high capital cost (Kam *et al.*, 2002; Kim, 2002; Volesky, 1990). Generally activated carbon, silica gel, activated alumina and ion exchange resin have higher capacity in the removal of toxic heavy metals. However, their utilization is not common and confined to special treatment due to high installation and operating cost. Therefore, many researchers have applied regenerated natural wastes to treat heavy metals from aqueous solutions (Chiron *et al.*, 2003; Mukami, 1981; Dipak *et al.*, 1993; Lee, 1994; Cho *et al.*, 1994). Dipak *et al.* (1993) studied the adsorption capacity of heavy metals with rice hulls and green algae. And Lee (1994) and Cho *et al.* (1994) reported adsorption results of heavy metals on the shell of crab and shell of shrimp, respectively. From the removal of lead by shell of crab, Lee suggested potential possibility of regenerated wastes as adsorbents (Lee, 1994). In addition, the applicability of wastes such as scoria, fly ash, zeolite, chitosan, sawdust and coal has been studied (Kwon *et al.*, 2005; Nugteren *et al.*, 2002; Inglezakis and Grigoropoulou, 2004; Cao *et al.*, 2004; Kim and Ryu, 1995).

Important issues in the industrial process are minimization of wastes, recovery of precious material, and maximum regeneration of wastes and energy. Eggshell waste is widely produced from house, restaurant and

Project supported by the Grant from Inje University, 2000.

*Corresponding author. E-mail: phjenv@yahoo.co.kr.

bakery. Eggshell has a little developed porosity and pure CaCO_3 as an important constituent. In this work, reuse of eggshell was investigated in the viewpoint of the recycle of wastes and minimization of contaminants. Physical and chemical properties of the treated eggshell were investigated and potential applicability of the treated eggshell in the removal of heavy metals was studied with both synthetic and real wastewater.

1 Materials and methods

1.1 Materials

Eggshell sample was collected from bakeries in Busan City in Korea. To remove impurity and interference material such as organics and salts, the sample was rinsed several times with deionized water. Then, the sample was dried at 100°C for 24 h in the dry oven after filtering the sample with $0.45\ \mu\text{m}$ membrane filters. Calcination was performed in the furnace at 800°C for 2 h after crushing the dried sample. Finally, samples having 40–100 mesh separated with a vibration selector were used. This fraction was approximately 60% of the total dried sample.

The real electroplating wastewaters containing Cr, Pb and Cd were obtained from the wastewater treatment facility located at a Noksan Electroplating Cooperative Association in Busan City in Korea. The composition of each real electroplating wastewater is shown in Table 1. The pH of all real electroplating wastewaters containing heavy metals was below 3. To study the neutralization of acidic wastewater by calcined eggshell, acidic wastewater below pH 2 (pH 1.73) was used.

1.2 Methods

In order to characterize calcination of eggshell, Thermal gravimetric analyzer (TGA-951 DuPont Instruments Co., USA) was used. A portion of the dried eggshell previously removed impurity and interference material such as organics and salts was loaded in the TGA analyzer and then pyrolysis was performed up to 900°C at an elevation of temperature $40^\circ\text{C}/\text{min}$ with continuous injection of N_2 .

X-ray fluorescence (XRF-1500, Shimadzu, Japan) was used for the qualitative and quantitative analyses of the inorganic compositions in the natural and calcined eggshells. The mineralogy of the natural and calcined eggshells was characterized by X-ray Diffractor (X-ray Diffractometer, Rikaku PMG-S2, 30 kV \times 16 mA). The image of the surface of natural and calcined eggshell was obtained by Scanning electron microscope (SM-300, Topcon, Japan).

Table 1 Composition of real electroplating wastewater and dosage of calcined eggshells

Wastewater	Concentration (mg/L)	pH	Dosage of calcined eggshell (g)
Cr	451	2.94	1–32
Pb (RUN1)	16.5	2.84	0.01–0.11
(RUN2)	20.6	2.34	0.01–0.11
Cd	17.0	2.61	0.01–0.1
Acid		1.75	1–3.5

All synthetic wastewaters containing heavy metals (3 mg/L of Pb, Cd, and Cr) were prepared with dilution of 1000 mg/L standard solution (Sigma, USA). In batch experiments, 20.0 g of eggshell was mixed with 800 ml solution containing heavy metals at 200 r/min and at room temperatures ($23\text{--}25^\circ\text{C}$). A portion of supernatant was removed from solution at a constant time interval and then each dissolved metal ion was measured with Induced coupling plasma (ICP, GBC XMP).

A jar-tester was used in the treatment of real electroplating wastewater. Different amount of calcined eggshell as shown in Table 1 was mixed with each 500 ml of real electroplating wastewater. All experiments were performed at 120 r/min initially as a rapid mixing and then at 30 r/min as a slow mixing. After 20 min of slow mixing, the supernatant was filtered with $0.45\ \mu\text{m}$ membrane filter. The dissolved metal ion was measured with the ICP.

2 Results and discussion

2.1 Calcinations of eggshell

TGA was used to characterize calcination of eggshell. TGA profile of raw eggshell with variation of temperature is shown in Fig.1. When the sample was burned up to 800°C at a heating speed of $40^\circ\text{C}/\text{min}$, calcination of eggshell began approximately at 650°C and then near complete calcination was observed at 770°C , resulting in phase-change in the sample. As most organics and humidity was removed during the pre-treatment process, a major composition of the sample was identified as pure CaCO_3 in a temperature ranging from $0\text{--}640^\circ\text{C}$. When temperature was between $670\text{--}750^\circ\text{C}$, both CaCO_3 and CaO was identified as an important composition of the sample. As the TGA curve was parallel with X-axis after 750°C , it was assumed that most fraction of the sample was changed to CaO by final pyrolysis. The description for the identification of CaCO_3 and CaO was mentioned in XRD measurement.

2.2 Composition of samples

Before calcination, Ca as limestone (91.94%) and Si (4.30%) were the important inorganic compositions of eggshell. A similar result was reported from the investigation of the chemical composition of natural and boiled hen and duck egg shells by X-ray fluorescence spectrometer

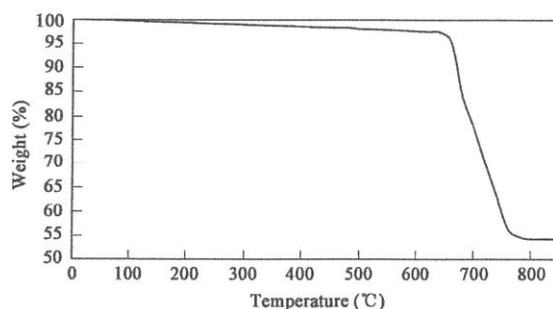


Fig. 1 TGA profile of raw eggshell due to thermal decomposition.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Arunlertaree *et al.*, 2007). They reported that all egg shells had similar chemical contents which mainly composed of CaCO₃ and a few of other elements; i.e. S, Mg, P, Al, K and Sr. After calcination, the major inorganic composition was identified as lime (99.63%) and K, P and Sr was minor compositions. This result indicates that the compositions of eggshell can be changed by calcination as shown in Table 2 and suggests that relatively pure sample can be obtained from eggshell by removal of mere organic compositions.

X-ray diffraction spectra of natural and calcined eggshell samples were obtained with CuK_α radiation (λ = 0.15406 nm) at 30 kV, 16 mA, scan speed of 8.0 θ/min and scan range 10–90 θ. Fig.2a shows a X-ray diffraction spectrum of natural eggshell. Main peak appeared at 2θ = 29.5. In addition, this spectrum shows several peaks at 2θ = 23.2, 31.5, 36.1, 39.5, 43.3, 47.3, 47.6, 48.7, 56.7, 57.6, 60.8, 61.1, 64.8 and 65.8. The XRD peak information of natural and calcined eggshell is summarized in Tables 3 and 4, respectively. Comparing the XRD peak information of Fig.2a with JCPDS file, the peaks are well matched with that of limestone (CaCO₃). Fig.2b shows a X-ray diffraction spectrum of the calcined eggshell at 800°C for 2 h. Main peak appeared at 2θ = 37.4. In addition, several peaks appeared at 2θ = 32.3, 53.9, 64.2, 67.5, and 79.7. Also comparing this XRD peak information of Fig.2b with the JCPDS file, the peaks were well matched with that of lime (CaO). As the peak of Ca as limestone (2θ = 29.5) was not shown in the X-ray diffraction spectrum of the calcined eggshell, most limestone (CaCO₃) might be transformed to lime (CaO). Compared to other results with chitosan, corbicular japonica and ostrea virginica,

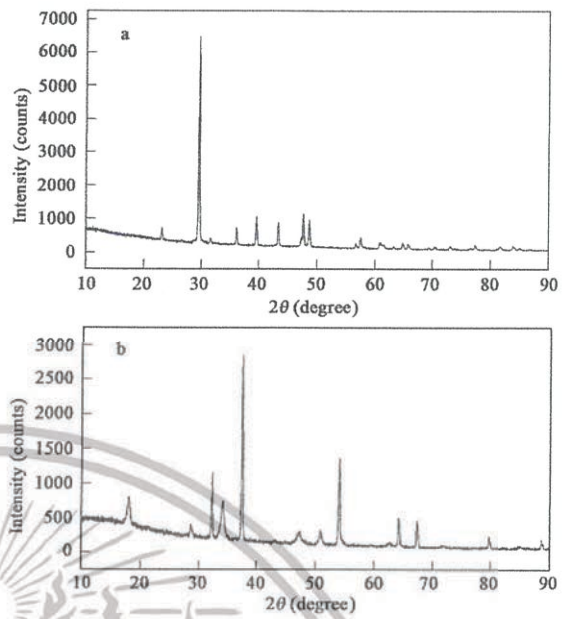


Fig. 2 X-ray diffraction spectra of (a) CaCO₃ in natural eggshell and (b) CaO in calcined eggshell.

limestone (CaCO₃) in eggshell is susceptible to change into lime (CaO) (Choi and Ahn, 1990; Park *et al.*, 2001).

2.3 Surface analysis of calcined samples

SEM images of eggshell sample before and after calcination are shown in Figs.3a and 3b, respectively. Before calcination, natural eggshell had a generally irregular crystal structure. After calcination at 800°C for 2 h, as shown in Fig.3b, the crystal structure has been changed and much developed pore was observed from the emission of CO₂. The formation of CO₂ was assumed to follow an endothermic reaction as described in Reaction (1).



Borgwardt (1985) reported that the BET surface area of CaO formed by rapid calcination of limestones is 50 to 90 m²/g.

Table 2 Composition of eggshells (natural and calcined) by X-ray fluorescence

Compound	Natural (%)	Calcined (%)	Compound	Natural (%)	Calcined (%)
Ca	91.94	99.63	P	0.32	0.06
Si	4.30		Cl	0.25	
Al	1.44		Sr	0.16	0.16
Na	0.53		Fe	0.09	
K	0.48	0.14	Zn	0.07	
F	0.42		Zr	0.01	

Table 3 Chart list of X-ray diffraction on natural eggshell

Peak No.	d-Value	Intensity	2θ	Peak No.	d-Value	Intensity	2θ
1	3.834	236	23.18	8	1.869	615	48.66
2	3.023	4325	29.52	9	1.622	111	56.70
3	2.484	362	36.12	10	1.599	251	57.56
4	2.278	616	39.52	11	1.521	149	60.82
5	2.089	496	43.28	12	1.515	99	61.10
6	1.920	196	47.30	13	1.436	155	64.84
7	1.908	799	47.62	14	1.418	145	65.76

Table 4 Chart list of X-ray diffraction on calcined eggshell

Peak No.	d-Value	Intensity	2θ	Peak No.	d-Value	Intensity	2θ
1	2.769	625	32.30	4	1.449	347	64.22
2	2.401	1964	37.42	5	1.387	336	67.46
3	1.699	989	53.92	6	1.201	144	79.72

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

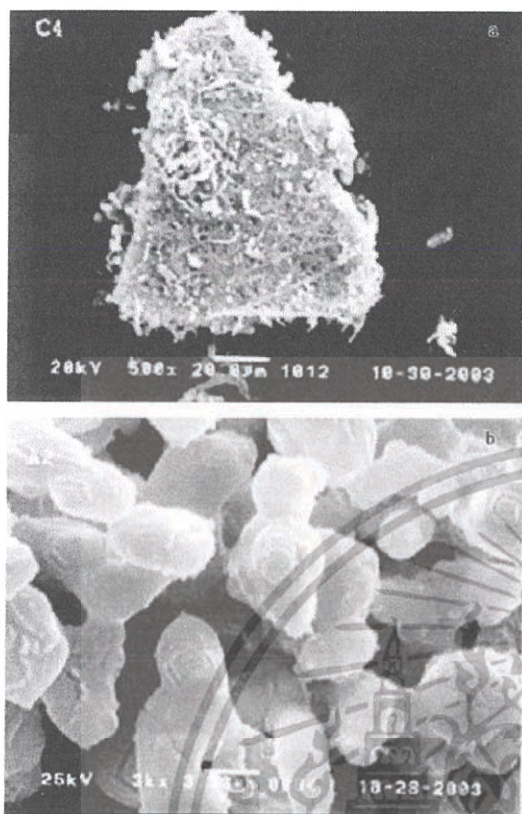


Fig. 3 SEM images for natural eggshell (a) and calcined eggshell (b).

2.4 Removal of heavy metal

Removal trends of Cd, Pb and Cr as a function of time are shown in Figs.4a, 4b and 4c. During the removal experiments, solution pH was rapidly increased from 6.55 to around 12.0 within 20 s. Rapid removal of Cd and Cr was observed with the calcined eggshell compared to the natural eggshell. By using the calcined samples, a complete removal of Cd as well as above 99% removal of Cr was observed after 10 min. This result indicates that alkalinity of the calcined eggshell (CaO) effects on the efficient removal of heavy metal ions through precipitation. The resultant high solution pH (alkalinity) could be explained by the dissolution of CaO as described in Reaction (2).



Although natural eggshell also had some removal capacity of Cd and Cr, the removal rate was quite slow and complete removal was not accomplished even after 60 min. Removal of Cd and Cr with natural eggshell was approximately 24% and 30%, respectively, after 10 min. However, in contrast to removal trends of Cd and Cr, removal of Pb was favorable in the presence of natural eggshell and was 86% after 10 min and then reached 100% after 40 min. Removal of Pb in the presence calcined sample was quite slow and approached to just 70% even after 1 h. In the absence of any complexing species, the speciation of dissolved lead depends only on the solution pH, causing a different distribution of the metal-hydroxyl complex. This was confirmed by the distribution

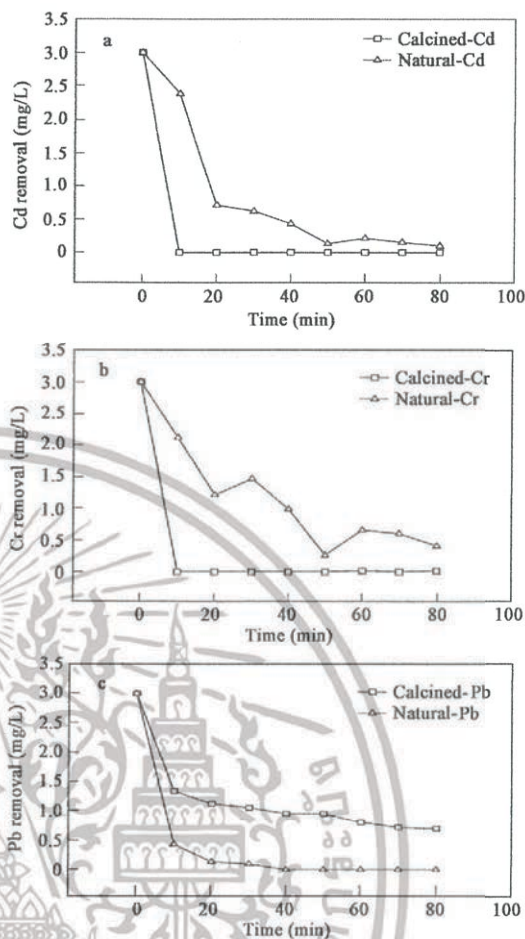


Fig. 4 Removal of heavy metal from synthetic wastewater with variation of time. (a) Cd; (b) Cr; (c) Pb.

of hydrolyzed lead species (3 mg/L), as calculated by the MINEQL software as shown in Fig.5. In this simulation result, free Pb^{2+} ion was the major species up to pH 6. And precipitation of lead as $\text{Pb}(\text{OH})_2$ was predicted above pH 6. However soluble lead species as $\text{Pb}(\text{OH})_4^{2-}$ was again predicted above pH 12. This simulation result supports the observed favorable removal of lead in the presence of natural eggshell rather than in the presence of the calcined eggshell. In the presence of natural eggshell, lead was

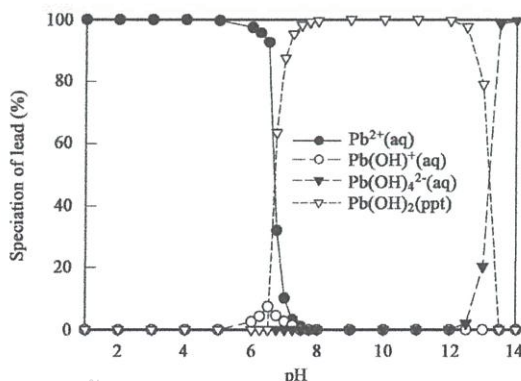


Fig. 5 Speciation of lead ion (3 mg/L) in aqueous solution predicted by MINEQL software.

removed through precipitation because the solution pH was below 10, while this removal through precipitation did not occur in the presence of the calcined eggshell due to a soluble lead species. In case of Cd and Cr, simulation result predicted precipitation of Cd and Cr even at high alkaline pH in contrast to Pb.

Generally hydroxide and sulfide precipitation methods were widely used in the treatment of heavy metal ions through precipitations. Hydroxide precipitation was known efficient only at high pH values > 9.0 (Zhou et al., 1999). Therefore pH adjustment by considering optimum pH ranges is a key process in the treatment of heavy metal ions through precipitation. As observed in Fig.4, solution pH in all cases (data not shown) was rapidly increased from 6.55 to above 12.0 within 20 s with calcined eggshell. This clearly suggests that calcined eggshell is a promising material in the treatment of waste water contaminated with heavy metal ions.

2.5 Application of calcined eggshell on the treatment of real electroplating wastewater

Figure 6a shows a removal trend of Cd as well as pH variation in real electroplating wastewater with variation of the dosage of calcined eggshell. Compared with removal trends of Cr and Pb, a different removal trend was observed. The removed amount of Cd linearly increased as the dosage of the calcined eggshell increased up to 0.06 g and then dissolved Cd concentration dropped below detection limit after 0.06 g. This trend was also observed in the pH variation in wastewater. A linear increase of solution pH was observed up to 0.06 g of the calcined eggshell, however, a sharp increase of the solution pH was observed above 0.06 g of the calcined eggshell. From this study, removal of Cd might occur through more than one type of mechanism i.e., adsorption and precipitation, especially at the high doses of eggshell.

Figure 6b shows a removal trend of Cr as well as pH variation in real electroplating wastewater with variation of the dosage of calcined eggshell. The rapid removal of Cr and neutralization of solution pH was observed at an addition of calcined eggshell up to 4 g. 75.8% of Cr was removed by addition of 2 g of calcined eggshell and the solution pH was reached to 7.2. However, no more significant removal of Cr was observed by addition of more than 4 g of calcined eggshell. 82.5% of Cr was removed by addition of 4 g of calcined eggshell and the solution pH was around 11. This result suggests that an optimum dosage of the calcined eggshell is 2 g. In this condition, the removal capacity of Cr with the calcined eggshell was 92.8 mg/g.

Figure 6c shows a removal trend of Pb as well as pH variation in real electroplating wastewater with variation of the dosage of calcined eggshell. As similar with the treatment of wastewater containing Cr, rapid removal of Pb and neutralization of solution pH was observed by addition of calcined eggshell up to 0.03 g. A complete removal of Pb was observed by addition of 0.03 g of calcined eggshell and the solution pH was around 6. In this condition, the removed amount of Pb by calcined eggshell was 343.3 mg/g.

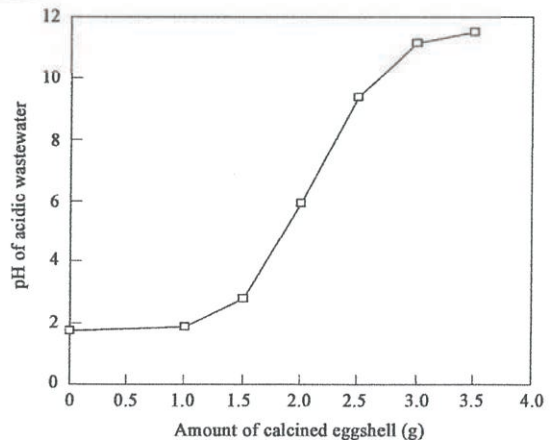
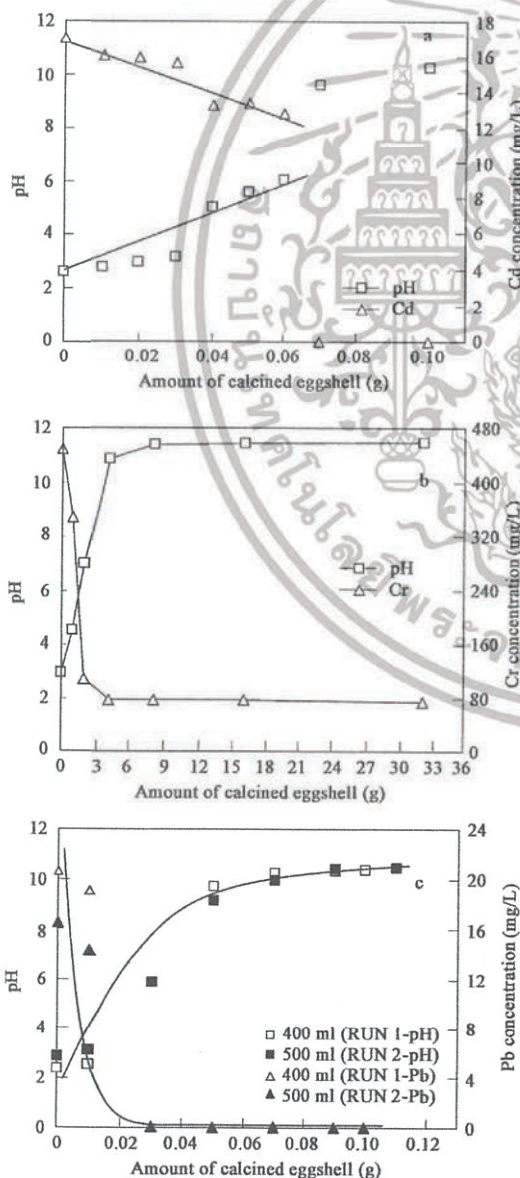


Fig. 6 Removal of heavy metal from real electroplating wastewater and pH variation. (a) Cd; (b) Cr; (c) Pb.

Fig. 7 Neutralization of strong acidic wastewater with variation of the calcined eggshell.

Figure 7 shows neutralization capacity of the calcined eggshell in the treatment of strong acidic real wastewater (pH 1.75). Although a little pH variation was noted by addition of the calcined eggshell up to 1.5 g, an important neutralization effect was observed by addition of 2–2.5 g of the calcined eggshell.

3 Conclusions

The changes of the properties of eggshell before and after calcination were identified with TGA, XRF, XRD and SEM analyses. After calcination, most composition of eggshell was transformed to lime (CaO) as well as enlargement of pore and grain was observed. These results strongly suggest plausible reuse of calcinated eggshell in the treatment of wastewater contaminated with heavy metal. From the studies on the reuse of waste eggshell in the removal of toxic heavy metals, removal of both Cd and Cr in synthetic wastewater was much enhanced in the presence of calcined eggshell, however, removal of Pb was rather favorable with natural eggshell. This may be related with different major composition in the sample before and after calcinations as well as different affinity of each composition in the removal of each metal ion. When the calcined eggshell was applied in the treatment of real electroplating wastewater, the calcined eggshell was identified as a good material in the treatment of strong acidic wastewater through a plausible uptake of heavy metal ions as well as a good neutralization capacity.

References

- Arunlertaree C, Kaewsomboon W, Kumsopa A *et al.*, 2007. Removal of lead from battery manufacturing wastewater by egg shell[J]. *Songklanakarin J Sci Technol*, 29: 857–868.
- Borgwardt R H, 1985. Calcination kinetics and surface area of dispersed limestone particles[J]. *AIChE*, 31: 103–111.
- Cao L Q, Xu S M, Feng S *et al.*, 2004. Adsorption of Zn(II) ion onto crosslinked amphoteric starch in aqueous solutions[J]. *J Polymer Res*, 11: 105–108.
- Chiron N, Guilet R, Deydier E, 2003. Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto a grafted silica: isotherms and kinetic models[J]. *Wat Res*, 37: 3079–3086.
- Cho B S, 1994. A study on heavy metal adsorption using shrimp shell[D]. Master's degree thesis, Chosun University, Korea.
- Choi K S, Ahn H S, 1990. A study on synthesis of cross-linked chitosan phosphate and adsorption characteristics of metallic ions[J]. *Polymer*, 4: 516–526.
- Dipak R, Greenlaw P N, Shane B S, 1993. Adsorption of heavy metals by green algae and ground rice hulls[J]. *J Environ Sci Health Part A*, 28: 37–50.
- Inglezakis V J, Grigoropoulou H, 2004. Effects of operating conditions on the removal of heavy metals by zeolite in fixed bed reactors[J]. *J Hazard Mater*, 112: 37–43.
- Kam S K, Hong J Y, Hyun S S *et al.*, 2002. Removal of copper ion by Na-PI synthesized from Jeju scoria[J]. *J of Kor Environ Sci*, 11: 75–83.
- Kim D W, Ryu H S, 1995. The synthesis of various coal species cation exchangers and its ion exchange capacity[J]. *J of Korean Institute of Industrial Educators*, 10: 143–152.
- Kim D S, 2002. A study on the removal of mixed heavy metal ion using crab shell[J]. *J of Kor Environ Sci*, 11: 729–735.
- Kwon J S, Yun S T, Kim S O *et al.*, 2005. Sorption of Zn(II) in aqueous solutions by scoria[J]. *Chemosphere*, 60: 1416–1426.
- Lee S H, 1994. Study on the adsorption characteristics of heavy metals onto the crab, *Portunus trituberculatus* shell[D]. Doctor's degree thesis, Hyosung Womans University.
- Marin J, Ayele J, 2002. Removal of some heavy metal cations from aqueous solutions by spruce sawdust: I. Study of the binding mechanism through batch experiments[J]. *Environ Technol*, 23: 1157–1171.
- Mukami Y, 1981. New developments in zeolite science and technology[C]. *Proceedings of 7th International Zeolite Conference*, Tokyo, 17–22.
- Nugteren H W, Janssen J M, Scarlett B, 2002. Removal of heavy metals from fly ash and the impact on its quality[J]. *J Chemical Technology & Biotechnology*, 77: 389–395.
- Park H J, Lee B H, Jeong S U, 2001. Calcination characteristics of *Corbicular japonica* and *Ostrea virginica*[J]. *J of Kor Environ Sci*, 23: 1835–1842.
- Volesky B, 1990. *Biosorption and biosorbents*[M]. In: *Biosorption of heavy metals*. Boston: CRC Press.
- Yoo H Y, Lee H Y, Jeong W J *et al.*, 2002. Preparation of ion exchanger from waste paper cup and removal characteristics of heavy metal[J]. *J of Kor Environ Sci*, 11: 993–999.
- Zhou P, Huang J C, Li A W F *et al.*, 1999. Heavy metal removal from wastewater in fluidized bed reactor[J]. *Wat Res*, 33: 1918–1924.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014

Thermoelectric Energy Conversion of $p\text{-Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-CaMnO}_3$ Module

Tosawat Seetawan^{a*}, Kunchit Singsoog^a, Suriya Srichai^a, Chanchana Thanachayanont^b, Vittaya Amornkitbamrung^c, Prinya Chindaprasirt^d

^aThermoelectrics Research Center, Research and Development Institution, Sakon Nakhon Rajabhat University, 680 Nittayo Rd., Sakon Nakhon, 47000, Thailand

^bNational Metal and Materials Technology Center 114 Thailand Science Park, Paholyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 12120, Thailand

^cIntegrated Nanotechnology Research Center Khon Kaen University, 40002, Thailand

^dSustainable Infrastructure Research Development Center, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, 40002, Thailand

Abstract

A TE module based on low-temperature difference (ΔT) of 12 pairs of $p\text{-Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-CaMnO}_3$ ($p\text{-CCO}/n\text{-CMO}$) legs with novelty dimensions of $0.5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ was fabricated using low cost of Cu electrodes and ceramic substrates. With a hot-side temperature of the module at 473 K and ΔT of 200 K in air with load resistance of 0.1–0.75 k Ω , the module generated up to an output voltage (V_{out}) of 0.8 V, output current (I_{out}) of 2.46 mA, maximum output power (P_{out}) of 1.98 mW and maximum conversion efficiency (η) of 0.15 %.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).
Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of ICAE2014

Keywords: thermoelectric energy conversion, $p\text{-Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-CaMnO}_3$ module, novelty TE legs dimension, thermoelectric properties

1. Introduction

Because of global energy and environmental problems, research and development has been promoted in the field of thermoelectric (TE) modules which use heat energy that can be converted directly into electrical energy. Such modules offer alternative energy, low-cost electricity, and green energy technology without the use of moving parts or production of environmentally deleterious wastes [1–2].

* Corresponding author. Tel.: +6-642-744-319; fax: +6-642-744-319.
E-mail address: t_seetawan@snru.ac.th

TE modules have been used in military, aerospace, instrument, industrial and commercial products, as power-generation devices for specific purposes. The old TE modules based on Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 provide η of about 4–5% [3] but they are toxic and cannot be used at high temperatures. Several pieces of work have investigated the fabrication, performance and application of oxide-based TE modules such as the $p\text{-Ca}_{2.76}\text{Cu}_{0.24}\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-Ca}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{MnO}_3$ [3], $p\text{-Ca}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-La}_{0.9}\text{Bi}_{0.1}\text{NiO}_3$ [4], $p\text{-Ca}_{2.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-Ca}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{MnO}_3$ [5], $p\text{-Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-(ZnO)}_7\text{In}_2\text{O}_3$ [6], $p\text{-Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-Ca}_{0.95}\text{Sm}_{0.05}\text{MnO}_3$ [7], $p\text{-Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{PbO}_3/n\text{-Li-doped NiO}$ [8], $p\text{-Ca}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Co}_4\text{O}_9/n\text{-CaMn}_{0.98}\text{Mo}_{0.02}\text{O}_3$ [9]. In this study, we purposed the module using 12 pairs of $p\text{-CCO}$ and $n\text{-CMO}$, Cu electrodes, and ceramic substrates for low cost. The TE type, TE properties, power generation and η were measured and analysed. Furthermore, we extracted CaCO_3 from environmentally friendly golden apple snail to synthesis CCO and CMO materials by solid state reaction (SSR) method.

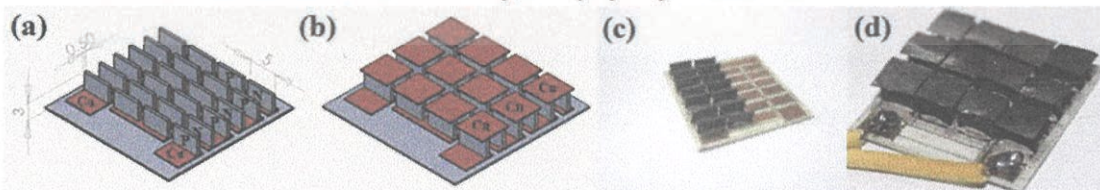
2. Materials and Method

2.1. Preparation of Materials and Thermoelectric Properties

The CCO material was obtained by mixing CaCO_3 with Co_3O_4 , calcined at 1173 K for 12 h and sintered at 1193 K for 24 h in air. The CMO material was prepared by mixing CaCO_3 with MnO_2 . Polyvinyl alcohol was added as a binder with CMO at a ratio of 1 g : 1 mL. Calcination was conducted at 1073 K for 24 h and sintering at 1423 K for 36 h in air. Both bulk materials were cut and polished by using a precision saw and grinder to measure crystal structure (XRD; SHIMUDZU), microstructure (SEM, TEM; JEOL) and TE properties (ZEM3; ULVAC).

2.2. Preparation of Thermoelectric Module

The module was fabricated from $p\text{-CCO}$ and $n\text{-CMO}$ pairs with dimension of $0.5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$, using Cu electrodes of 0.05 thickness and ceramic substrate dimensions of $5 \times 5 \times 1.0 \text{ mm}^3$ as shown in Fig. 1. The Cu electrodes were attached on the ceramic plates using epoxy adhesive to achieve electrical conduction. The twelve $p\text{-n}$ legs and Cu electrodes on the ceramic substrate were adhered by silver paint. The internal resistance (R_{in}), V_{out} and I_{out} of the module were measured. The maximum P_{out} was calculated by the V_{out} and I_{out} , which were found by changing a small amount of current with a source meter. The heat source T_{hot} had a value of 473 K and $\Delta T (T_{hot} - T_{cold})$ of 200 K. The V_{out} , in a close circuit on electrical load condition, can be deduced by the relation $V_{out} = V_0 R_L / (R_{in} + R_L)$ and the I_{out} is given by the relation $I_{out} = V_0 / (R_{in} + R_L)$. The module was placed on a hot plate, heated from 273 K to 473 K, and continuously measured to evaluate the efficiency, η . The efficiency, η , is defined as $\eta = I^2 R_L / \dot{Q}_H = I^2 R_L / n S_{p,n} T_H I + K_{p,n} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_{in}$ where \dot{Q}_H is heat flow from the source to the sink and the thermal conductance is given by $K_{p,n} = \kappa_p A_p / L_p + \kappa_n A_n / L_n$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 1. Schematic diagram of the module (a) *p* and *n* legs input to ceramic substrate, (b) attract Cu electrodes, (c) attract *p* and *n* legs and (d) fabricate TE module

3. Results and Discussion

3.1. Microstructure, Thermoelectric Type and Thermoelectric Properties

Fig. 2(a), (d) show the results of microstructure of CCO and CMO materials of agglomerated powder having sizes of 1–5 μm. The diffraction patterns indicate CCO has orthorhombic structure while CMO has cubic structure, in agreement with the XRD results. The high theoretical densities of 87.52% for CCO and 96.47% for CMO were obtained for both materials.

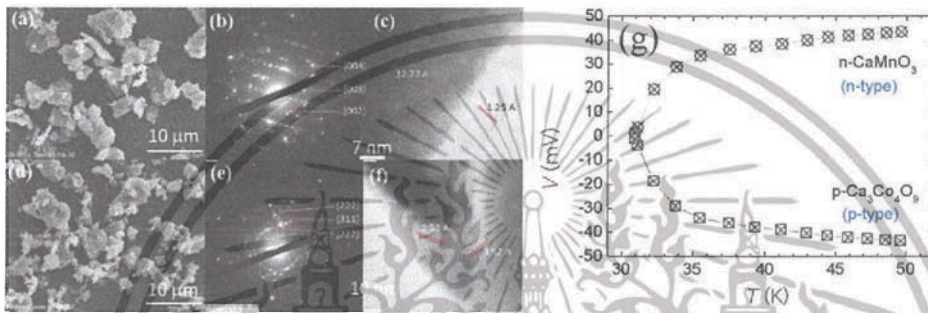


Fig. 2. (a) SEM micrographs of CCO powder, (b) TEM diffraction pattern showing $\text{Ca}_2\text{Co}_2\text{O}_7$ phase, (c) Bright field (BF) image of CCO, (d) SEM micrographs of CMO powder, (e) TEM diffraction pattern showing CaMnO_3 phase, (f) BF image of CMO, and (g) V vs T of *p*-CCO/*n*-CMO from hot probe

Fig. 3 (a–b) show results of the electrical resistivity (ρ), Seebeck coefficient (S), thermal conductivity (κ) versus temperature, following the relationship of $ZT = S^2T / \rho\kappa$.

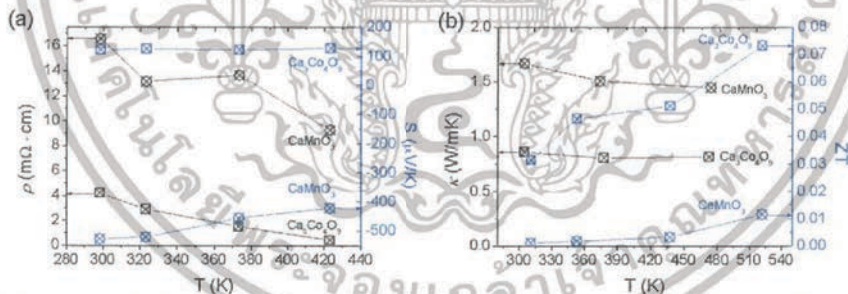


Fig. 3. (a) ρ and S of CCO and CMO materials vs T (b) κ and ZT of CCO and CMO materials vs T

3.2. Thermoelectric Power Generation

Fig. 4(a) shows V_{out} versus I_{out} for the same module and ΔT with different loads of 0.1–0.75 kΩ. Linear relationship obtained enabled V_0 to be calculated (as intercept on y-axis). The estimated V_0 value is 23.03 mV in these temperature conditions. The R_{in} resistance obtained by this method reaches 0.36 kΩ. The inset of Fig. 4 (b) shows the P_{out} curve of this module had a maximum value of 1.98 mW. The theoretical open circuit voltage (V_{cal}) value is given by the relation $V_{cal} = n(S_p - S_n)(T_{hot} - T_{cold})$, where

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n is the number of pairs [10]. For the module comprising twelve p - n pairs, $V_{cal} = 1.55$ V was calculated for ($S_p = 123.09 \mu\text{V}/\text{K}$, $S_n = -526.79 \mu\text{V}/\text{K}$, $T_{hot} - T_{cold} = 200$ K, $n = 12$); however, the measured open circuit voltage (V_{open}) of 1.5 V corresponds to only 96.16% of V_{cal} . The results of η versus ΔT are shown in Fig. 4(b) and the η_{max} value is 0.15% at $\Delta T = 200$ K. This low value is due to the high internal and contact resistances of the module which are known to be the main problem for TE module performance. For the manufacturing factor (MF) defined as $MF = R_{ideal} / R_m$ [11] where R_{ideal} is the ideal resistance, the results show an MF value of 0.3 in agreement with results shown by Shin W et al. [8].

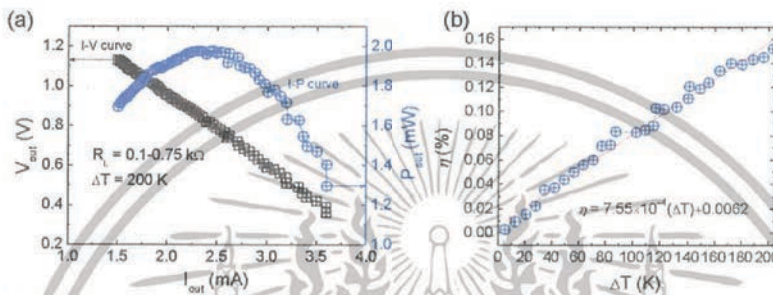


Fig. 4. (a) V_{out} vs I_{out} and P_{out} vs I_{out} and (b) η vs ΔT for difference electrical loads and ΔT of 200 K

4. Conclusion

A TE module, consisting of 12 pairs of p -CCO-Cu electrodes and n -CMO-Cu electrodes on ceramic substrates was fabricated. The maximum P_{out} of TE module under $\Delta T = 200$ K was 1.98 mW and increased with increasing ΔT . The maximum η of 0.15% can make cost-efficient electricity. This work was funded by the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT).

References

- [1] Gou X, Xiao H, Yang S. Modelling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Appl Energy* 2010;**87**:3131–6.
- [2] Chou SK, Yang WM, Chua KJ, Li J, Zhang KL. Development of micro power generators—A review. *Appl Energy* 2011;**88**:1–16.
- [3] Park K, Lee GW. Fabrication and thermoelectric power of π -shaped $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/\text{CaMnO}_3$ modules for renewable energy conversion. *Energy* 2013;**60**:87–93.
- [4] Funahashi R, Mikami M, Mihara T, Urata S, Ando N. Aporable thermoelectric-power-generating module composed of oxide devices. *J Appl Phys* 2006;**99**:066117-1–3.
- [5] Matsubara I, Funahashi R, Takeuchi T, Sodeoka S, Shimizu T, Ueno K. Fabrication of an all-oxide thermoelectric power generator. *Appl Phys Lett* 2001;**23**:3627–3629.
- [6] Choi SM, Lee KH, Lim CH, Seo WS. Oxide-based thermoelectric power generation module using p -type $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ and n -type $(\text{ZnO})\text{-In}_2\text{O}_3$ legs. *Energy Convers Manage* 2011;**52**:335–339.
- [7] Noudein JG, Lemonnier S, Prevel M, Reddy ES, Guilmeau E, Goupil C. Thermoelectric ceramics for generators. *J Eur Ceram Soc* 2008;**28**:41–48.
- [8] Shin W, Murayama N, Ikeda K, Sago S. Thermoelectric power generation using Li-doped NiO and $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{PbO}_3$ module. *J Power Sources* 2001;**103**:80–85.
- [9] Urata S, Funahashi R, Mihara T. Power generation of p -type $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/n$ -type CaMnO_3 module. In Proc int conf thermoelectrics, Vienna: Austria; 2006. p. 501–4.
- [10] Haidar JG, Ghogel JI. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermal electric generators. In Proc int conf thermoelectrics, Beijing: China; 2001. p. 413–7.
- [11] Barnard RD. *Thermoelectricity in metal and alloys*. London: Taylor and Francis; 1972.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้