

การสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ด้วยวิธีอินดักชัน
สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

SYNTHESIS OF Mg_2Si COMPOUND WITH INDUCTION
METHOD FOR THERMOELECTRIC MATERIAL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF Mg_2Si COMPOUND WITH INDUCTION
METHOD FOR THERMOELECTRIC MATERIAL



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ด้วยวิธีอินดักชันสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ชื่อนักศึกษา

นางสาวสุนิศา คำมะโฮง รหัสนักศึกษา 58051163

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.รัชนก สมพรเสน่ห์ กรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการ	
รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ด้วยวิธีอินดักชันสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุณิศา คำมะโฮง รหัสนักศึกษา 58051163
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการผันพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยปรากฏการณ์ซีเบค ซึ่งทำงานในย่านอุณหภูมิปานกลาง (อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300-600 °C) โครงการพิเศษนี้จึงหาแนวทางเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียม Mg_2Si เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์ถูกสังเคราะห์เพื่อยืนยันการเกิดเฟสของ Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและได้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาทีที่ทำให้เกิดเฟส Mg_2Si โดยการยืนยันจาก XRD หลังจากนั้นนำไปเผาขึ้นรูปด้วยระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศที่อุณหภูมิ 750°C และระบบเตาให้ความร้อนพร้อมอัดภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 750°C ทั้งสองเงื่อนไขถูกนำไปเชื่อมขั้วด้วยโลหะนำไฟฟ้าพร้อมทั้งวัดไฟฟ้าเบื้องต้น พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการเผาขึ้นรูปด้วยระบบเตาให้ความร้อนพร้อมอัดภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 750°C เมื่อนำไปวัดไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500°C ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 86.4 mV และค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 21.24 μA ดังนั้นสามารถนำไปพัฒนาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผันความร้อนในย่านอุณหภูมิต่ำดังกล่าวข้างต้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทนและนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อเป็นพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : ซิลิกอน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แมกนีเซียมซิลิไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	SYNTHESIS OF Mg_2Si COMPOUND WITH INDUCTION METHOD FOR THERMOELECTRIC MATERIAL
Student Name	Sunisar Khammahong
Student ID	58051163
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Chesta Ruttanapun

Abstract

Magnesium silicide (Mg_2Si) is a very interesting thermoelectric material. Because it has a high efficiency in conversion heat energy to electrical energy directly by the Seebeck Effect which works in the medium temperature area (Within a temperature range of 300-600 ° C). In the proposal this special project, to look for methods and conditions for preparing Mg_2Si to develop into a thermoelectric module material. The pure Mg and Si initial passengers were synthesized to confirm the phase formation of Mg_2Si with an induction heating furnace system with a vacuum quartz tube under the argon atmosphere and get the condition at 800°C for 2 minutes which caused the Mg_2Si phase confirmed by XRD. After that, it was burned by an induction heating system together with a vacuum quartz tube at 750°C and the furnace system was ready to compress under argon atmosphere at 750°C, both conditions are used to connect the electrodes. It was found that the best condition was the burning of the furnace by heating the system under the argon atmosphere at 750°C when the electricity was measured at 500°C the electric potential difference is about 86.4 mv and the current is 21.24 μA . Therefore, it can be developed into a thermoelectric material to produce electricity as an alternative energy and be applied in the industry as a renewable energy in the future.

Keywords : Induction system, Silicon, Magnesium silicide and Thermoelectric module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้นั้นผู้ทำวิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางและกระบวนการคิดวิเคราะห์อันเป็นประโยชน์ในหลายๆส่วน และติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินวิจัย แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ที่สุดจึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ในความกรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการคุมสอบ พร้อมทั้งช่วยให้คำแนะนำที่ดีและข้อเสนออันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยในการนำไปแก้ไขและปรับปรุงในงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้นไป

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์และศูนย์เครื่องมือคณะวิศวกรรมภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยอำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำและความรู้เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย อีกทั้งที่มีส่วนร่วมให้ความอนุเคราะห์ด้านการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณสมาชิกในหน่วยวิจัยและนวัตกรรมการด้านวัสดุอัจฉริยะทุกท่าน ที่คอยให้ความร่วมมือ สนับสนุน และช่วยเหลือทุกสิ่ง รวมไปถึงให้กำลังใจ ทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

ท้ายที่สุดแล้วคุณงามความดีที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นอันที่รักยิ่ง และครูบาอาจารย์ทั้งหมดที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุกๆ ท่านที่เกี่ยวข้องทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุนิศา คำมะโฮง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความเป็นมาและลำดับเหตุการณ์สำคัญทางเทอร์โมอิเล็กทริก.....	3
2.2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect).....	3
2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect).....	3
2.3 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.4 แมกนีเซียมซิลิไซด์ Mg_2Si	6
2.4.1 สมบัติของแมกนีเซียมซิลิไซด์.....	6
2.5 ซิลิกอน.....	7
2.5.1 โครงสร้างของซิลิกอน.....	7
2.6 แมกนีเซียม.....	7
2.6.1 คุณสมบัติเฉพาะของแมกนีเซียม.....	7
2.7 เทคนิคการตรวจสอบที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.7.1 การตรวจวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	10
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	10
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	10
3.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	11
3.3.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD).....	11
3.3.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	12
3.4 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์.....	13
3.5 เงื่อนไขการเผาแคลไซน์ Mg_2Si สำหรับวิเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์.....	15
3.6 การเผาซินเตอร์ Mg_2Si เตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับวัดค่า ไฟฟ้าเบื้องต้น.....	23
3.7 ขั้นตอนในการเชื่อมขั้วไฟฟ้าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและการวัด..... ไฟฟ้าเบื้องต้น.....	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	28
4.1 ผลการหาเงื่อนไขการเผาแคลไซน์ในการสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์.....	28
4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ แตกต่างกันโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD.....	30
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	30
4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ครั้งที่มีมีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	31
4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	31
4.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	32
4.2.5 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	32
4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ แตกต่างกันโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	34
4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	34
4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	35
4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	35
4.3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิมีการนำไปใช้

650 750 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 นาที่ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	38
4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยสเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry EDS) ของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	37
4.4.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที่ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	37
4.4.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที่ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	38
4.4.3 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที่ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	38
4.4.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที่ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	39
4.5 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	40
4.5.1 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 650°C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	40
4.5.2 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 750°C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	42
4.5.3 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันที่อุณหภูมิ 750°C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....	46

เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก.แสดงข้อมูล JCPDS Magnesium silicide (Mg ₂ Si).....	50
ภาคผนวก ข.ตารางแสดงรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินวิจัย.....	53
ภาคผนวก ค.ตารางบันทึกผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg ₂ Si.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงผลการดำเนินงาน.....	2
3.1 แสดงบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงการเผาแคลไซน์ Mg_2Si ตามเงื่อนไขเวลาต่างๆ.....	19
3.2 แสดงการหาค่าความหนาแน่นของสารประกอบ Mg_2Si	21
3.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการเผาแคลไซน์ Mg_2Si ตามเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ.....	22
4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารประกอบ Mg_2Si เผาแคลไซน์ในเงื่อนไขเวลา.....	28
4.2 แสดงตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนในแต่ละระนาบของโครงผลึก Mg_2Si	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองของ Thomas Seebeck.....	3
2.2 ปรากฏการณ์ซีเบคบนเส้นลวดเหล็กที่ต่ออยู่กับเส้นลวดทองแดง.....	4
2.3 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล.....	5
2.4 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์.....	5
2.5 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง.....	6
2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	8
2.7 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM).....	9
3.1 เครื่อง X-Ray Diffractometer รุ่น XRD-6100 ของบริษัท SHIMADZU.....	12
3.2 Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ประเทศ Germany.....	12
3.3 ซังสารแมกนีเซียมบนเครื่องซังดิจิตอล.....	13
3.4 ซังสารซิลิกอนบนเครื่องซังดิจิตอล.....	14
3.5 ผงแมกนีเซียมและซิลิกอนเตรียมบด.....	14
3.6 ผงแมกนีเซียมและซิลิกอนที่บดเป็นเนื้อเดียวกัน.....	14
3.7 (ก) แท่งบล็อกอัดสารที่มีผง Mg_2Si นำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกกึ่งอัตโนมัติ	
(ข) เม็ดสารตั้งต้น $2Mg + Si$ ที่ผ่านการผสมและอัดแล้ว.....	15
3.8 ถ้วยแกรไฟต์ที่มีเม็ด Mg_2Si	16
3.9 ระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศ	
ในบรรยากาศอาร์กอน.....	16
3.10 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 1 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์	
ของเม็ดสารตั้งต้น $2Mg + Si$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	
ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน.....	17
3.11 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 2 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์ของเม็ดสาร	
ตั้งต้น $2Mg + Si$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์	
สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน.....	17

3.12 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 3 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์ของเม็ดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ตั้งต้น $2Mg + Si$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์
 ไม่ว่าการนี้ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาภาคในบรรยากาศอาร์กอน.....	18
3.13 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 4 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซต์ของเม็ตสาร ตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์ สัญญาภาคในบรรยากาศอาร์กอน.....	18
3.14 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 5 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซต์ของเม็ต สารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์ สัญญาภาคในบรรยากาศอาร์กอน.....	19
3.15 เม็ตสาร Mg_2Si ที่อัดขึ้นรูปแล้ว.....	21
3.16 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C กับเวลา 2 นาทีที่ใช้ในการ เผาแคลไซต์ของเม็ตสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สัญญาภาคในบรรยากาศอาร์กอน.....	22
3.17 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมและวิเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si	23
3.18 (ก) เผาซินเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน (ข) เม็ตสาร Mg_2Si ที่อัดขึ้นรูป.....	24
3.19 (ก) ระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน (ข) แท่งโมดูล Mg_2Si หลังจากการเผาซินเตอร์.....	25
3.20 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ระบบเตาเผา แบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน.....	25
3.21 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมและวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si	26
3.22 โมดูล Mg_2Si ที่เชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะนำไฟฟ้า.....	26
3.23 อุปกรณ์ในการวัดไฟฟ้าเบื้องต้น.....	27
4.1 (ก) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 650 °C ในเวลา 2 นาที (ข) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 750 °C ในเวลา 2 นาที (ค) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเวลา 2 นาที (ง) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซต์ ที่อุณหภูมิ 900 °C ในเวลา 2 นาที.....	29
4.2 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซต์จากการสังเคราะห์	

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้ประโยชน์จากเอกสารนี้
 4.3 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซต์จากการสังเคราะห์ครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	31
4.4 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	31
4.5 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	32
4.6 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	32
4.7 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที่ ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b)	
4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d).....	34
4.8 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที่ ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b)	
4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d).....	35
4.9 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที่ ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b)	
4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d).....	35
4.10 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์	
ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที่ ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b)	
4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d).....	36
4.11 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์	
ที่เตรียมได้ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า.....	36
4.12 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si	
จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	37
4.13 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si	
จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที่.....	38
4.14 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si	

เอกสารจากการเผา แคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที่ นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 38 ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที่.....	39
4.16 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน.....	40
4.17 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน.....	41
4.18 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน.....	42
4.19 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน.....	43
4.20 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si	45

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
TEG	Thermoelectric generator	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
TEC	Thermoelectric cooler	เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นโดยที่พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดลดลงอย่างรวดเร็ว พลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมที่สูญเสียไป (อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200-600 °C เป็นย่านอุณหภูมิปานกลาง) ซึ่งมีศักยภาพสูงที่สามารถนำมาผันเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยปรากฏการณ์ซีเบค สารประกอบ Mg_2Si เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านอุณหภูมินี้ เพื่อสามารถผันพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าที่ทราบว่า Mg_2Si มีคุณสมบัติโครงสร้างทางไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปทำเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยที่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือวัสดุที่สามารถผันพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างด้านหนึ่งกับอีกด้านหนึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าและสามารถสร้างปรากฏการณ์ผกผันจากปรากฏการณ์นี้ จึงทราบว่าเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวทำความเย็นได้ วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นต้องสามารถเตรียมได้ง่ายในห้องปฏิบัติการและต้นทุนราคาถูกแล้วไม่เป็นอันตรายเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นโครงการพิเศษสนใจศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ด้วยอินดักชันสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อสังเคราะห์ Mg_2Si วัดคุณสมบัติโครงสร้างของ Mg_2Si เตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสาร Mg_2Si และวัดคุณสมบัติไฟฟ้าเบื้องต้น ดังนั้นสามารถนำไปเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผันความร้อนในย่านอุณหภูมิต่ำดังกล่าวข้างต้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทนและนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อเป็นพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ Mg_2Si จากสารตั้งต้นของผง Mg และ Si บริสุทธิ์
- 2) วิเคราะห์คุณสมบัติโครงสร้างของ Mg_2Si บริสุทธิ์ที่สังเคราะห์มาได้
- 3) เตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ Mg_2Si และวัดคุณสมบัติไฟฟ้าเบื้องต้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ Mg_2Si และวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2) ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ Mg_2Si บริสุทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) วัดคุณสมบัติทางโครงสร้าง วัดคุณสมบัติไฟฟ้าเบื้องต้น และวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของ Mg_2Si ที่สังเคราะห์ขึ้นมา

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si
- 2) สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสารประกอบ Mg_2Si จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์
- 3) ตรวจสอบโครงสร้างผลึก Mg_2Si จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์
- 4) เตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ Mg_2Si จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์
- 5) วัดคุณสมบัติไฟฟ้าเบื้องต้น
- 6) รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา						
	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน
ขั้นตอนที่ 1							
ขั้นตอนที่ 2							
ขั้นตอนที่ 3							
ขั้นตอนที่ 4							
ขั้นตอนที่ 5							
ขั้นตอนที่ 6							

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจในการบวนการสังเคราะห์ที่ทำให้เกิดเฟสของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si
- 2) เป็นแนวทางเริ่มต้นในการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si
- 3) สังเกตและศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ Mg และ Si
- 4) นำเอาความรู้และเทคนิคที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยและงานด้านอุตสาหกรรมก่อให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารเชิงวิชาการที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

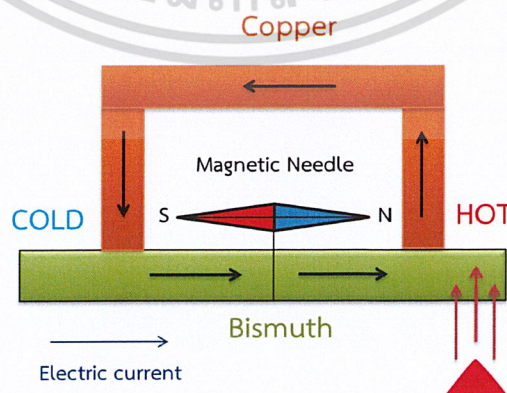
2.1 ความเป็นมาและลำดับเหตุการณ์สำคัญทางเทอร์โมอิเล็กทริก

องค์ความรู้ในศาสตร์ด้านเทอร์โมอิเล็กทริกได้มีการค้นพบและพัฒนาโดยเริ่มตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 18 ที่มีการค้นพบปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เชื่อมโยง และควบคู่กันระหว่างปรากฏการณ์เชิงความร้อนและปรากฏการณ์ไฟฟ้าในวัสดุของแข็ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถผันความร้อนให้เป็นไฟฟ้าและสามารถผันกลับจากไฟฟ้าเป็นความร้อน

2.2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect) [1]

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่พบในวัสดุของแข็ง มีลักษณะเป็นการคู่ควบกันระหว่างปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและปรากฏการณ์ทางความร้อน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน นั่นคือสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นในระบบได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิและขณะเดียวกันปรากฏการณ์นี้ยังสามารถเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน นั่นคือสามารถเปลี่ยนความแตกต่างของอุณหภูมิความร้อนในระบบให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นปรากฏการณ์นี้จึงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถย้อนกลับระหว่างความร้อนและไฟฟ้าได้ สำหรับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกงานวิจัยครั้งนี้เราสนใจศึกษาในหัวข้อปรากฏการณ์ของซีเบค (Seebeck effect) ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนต่างๆ ผันกลับมาเป็นไฟฟ้าได้โดยตรง

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.1 การทดลองของ Thomas Seebeckให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1821 นักฟิสิกส์ชาวเอสโทเนีย ชื่อ Thomas Johann Seebeck ได้ค้นพบโดยบังเอิญว่า ถ้าให้ความร้อนที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิด จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของโลหะ ดังรูปที่ 2.1 ได้สรุปว่าความแตกต่างของอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในโลหะ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) [2]

ปรากฏการณ์ซีเบคเกิดขึ้นเมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิบนปลายทั้งสองข้างของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก กล่าวคือปลายด้านหนึ่งของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดความร้อนและปลายอีกด้านหนึ่งเย็น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมปลายทั้งสองข้างของวัสดุ ดังรูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองด้านของวัสดุ โดยที่ความต่างศักย์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ซีเบคบนเส้นลวดเหล็กที่ต่ออยู่กับเส้นลวดทองแดง
เมื่อกำหนดให้ ΔV คือความต่างศักย์ของไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) โดยที่ $\Delta V = V_h - V_c$ เมื่อ V_h คือศักย์ไฟฟ้าด้านอุณหภูมิร้อน และ V_c คือศักย์ไฟฟ้าด้านอุณหภูมิต่ำ สำหรับความต่างของอุณหภูมิมีสัญลักษณ์เป็น ΔT มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) หรือเคลวิน (K) โดยที่ $\Delta T = T_h - T_c$ ซึ่ง T_h คืออุณหภูมิด้านร้อนส่วน T_c คืออุณหภูมิด้านเย็น ดังนั้นสมการของปรากฏการณ์ซีเบคเขียนได้เป็น

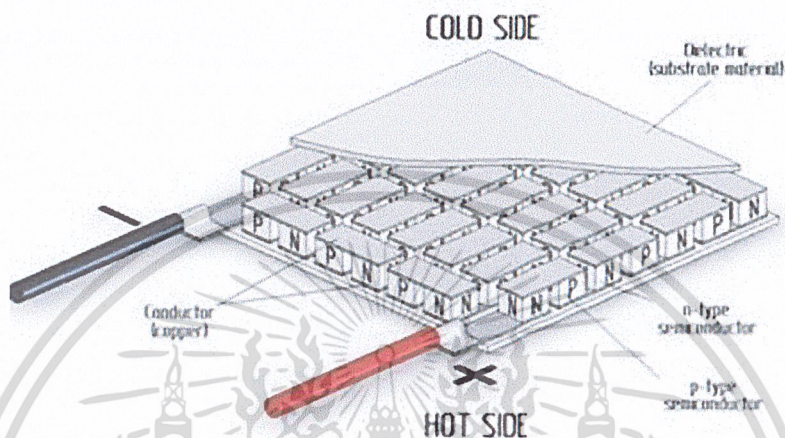
$$\Delta V = s \Delta T \tag{2.1}$$

เมื่อ s คือสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเคลวิน (V/K) หรือ โวลต์ต่อองศาเซลเซียส (V/ $^{\circ}\text{C}$)

2.3 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [1]

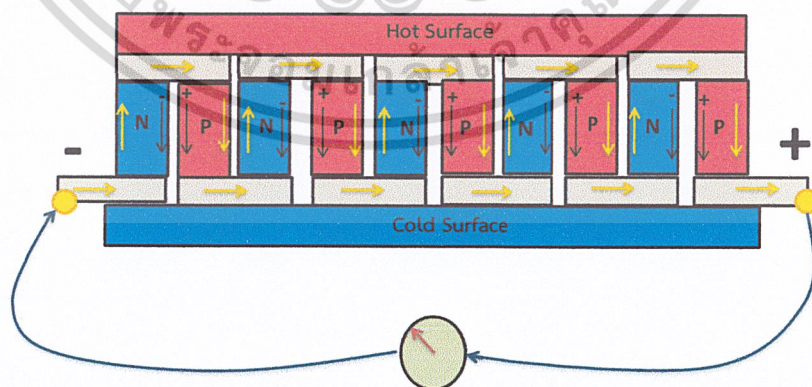
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นการนำเอาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประกอบให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ เรียกว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) ชนิดเอ็นและชนิดพีมาต่อกันเป็นคู่ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้า ตั้งแต่ตัวแรกจนถึงตัวสุดท้าย และด้านบนกับด้านล่างถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [3]

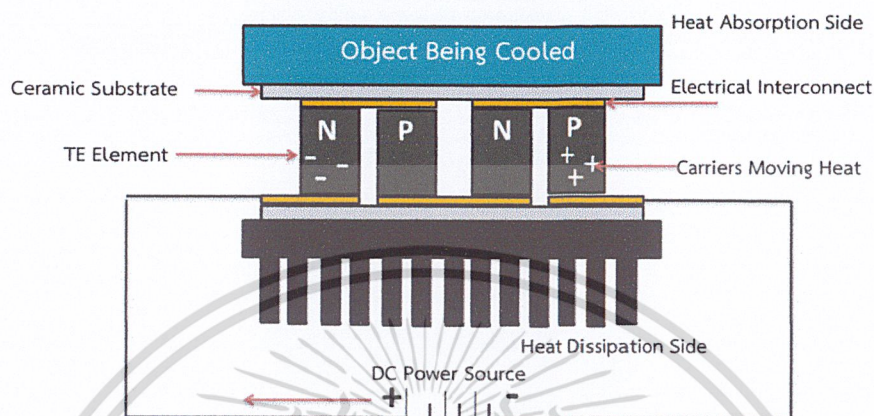
เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกบด้วยแผ่นเซรามิกแล้วทำให้อุณหภูมิแผ่นเซรามิกด้านบนและด้านล่างแตกต่างกัน ทำให้เกิดปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้ และเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (load) หรือภาระไฟฟ้าจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล ตามปรากฏการณ์ของซีเบคโดยทั่วไปเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (thermoelectric generator ; TEG) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกันเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่างตามปรากฏการณ์ของเพลทีเยอร์โดยทั่วไปเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง (thermoelectric cooling ; TEC) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง

2.4 แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)

แมกนีเซียมซิลิไซด์ถือว่าเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Mg_2Si) เป็นวัสดุจำพวกโลหะผสม ทั้งยังจัดให้อยู่ในประเภทสารประกอบซิลิไซด์ (Silicide) เป็นวัสดุที่ต้นทุนมีราคาถูกและหาได้ง่าย และมีเสถียรภาพสูง ซึ่งซิลิกอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบซิลิไซด์ ทั้งนี้ซิลิกอนยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับธาตุตัวอื่นๆ ที่ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

2.4.1 สมบัติของแมกนีเซียมซิลิไซด์

ชื่อ : แมกนีเซียมซิลิไซด์

สัญลักษณ์ : Mg_2Si

ความหนาแน่น : 1.99 g/cm^3

จุดหลอมเหลว : $1,102^\circ\text{C}$ ($2,016^\circ\text{F}$, 1375 K)

น้ำหนักโมเลกุล : 76.695 g/mol

การละลายน้ำ : ไม่ละลาย

โครงสร้างผลึก : ลูกบาศก์ FCC

ค่าคงที่แลตทิซ : 0.6351 nm

แมกนีเซียมซิลิไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-centered cubic : FCC) ซึ่งมีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของโครงสร้างผลึกใน 1 หน่วยเซลล์ดังรูปที่ 2.6 Mg_2Si มีความหนาแน่น 1.988 g/cm^3 ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ซิลิกอน [5]

ซิลิกอนมีลักษณะโครงสร้างแบบผลึกมีสีเทา สมบัติกึ่งโลหะ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 ในโลก ปริมาณ ร้อยละ 25.7 (โดยน้ำหนักกรองจากออกซิเจน) โดยทั่วไปจะไม่พบซิลิกอนบริสุทธิ์ในธรรมชาติ แต่จะพบเป็นสารประกอบออกไซด์หรือซิลิเกต (มีโลหะผสมอยู่ เช่น แกรไฟต์ แร่ใยหิน เฟลสปาร์ และ ไมกา เป็นต้น) ในรูปของผลึกซึ่งมีซิลิกอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ที่เรารู้จักกันดี คือ ซิลิกา หรือ ควอตซ์ (SiO₂) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 1,710 องศาเซลเซียส

2.5.1 โครงสร้างของซิลิกอน [6]

ซิลิกอนมีโครงสร้างแบบเพชร (Diamond structure) โดยมีโครงสร้างแบบ Tetrahedral มีขนาดหน่วยเซลล์ a=b=c อยู่ช่วง 5.42-5.43 อังสตรอม ใน 1 หน่วยเซลล์มีซิลิกอน 8 อะตอม

2.6 แมกนีเซียม

แมกนีเซียม (Magnesium) เป็นธาตุในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Mg และเลขอะตอม 12 แมกนีเซียมเป็นธาตุที่มีอยู่มากเป็นอันดับ 8 และเป็นส่วนประกอบของเปลือกโลกประมาณ 2% และเป็นธาตุที่ละลายในน้ำทะเลมากเป็นอันดับ 3 โลหะอัลคาไลเอิร์ธตัวนี้ส่วนมากใช้เป็นตัวผสมโลหะเพื่อทำโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

2.6.1 คุณสมบัติเฉพาะของแมกนีเซียม

ชื่อ : แมกนีเซียม (Magnesium)

สัญลักษณ์ : Mg

เลขอะตอม : 12

น้ำหนักอะตอม : 24.32

โครงสร้างผลึก : Hexagonal

ความถ่วงจำเพาะ ที่ 20 °C : 1.7388 กรัม/ซม³

ความถ่วงจำเพาะ ที่ 700 °C : 1.544 กรัม/ซม³

ความถ่วงจำเพาะที่จุดหลอมเหลว : 1.624 กรัม/ซม³

ความถ่วงจำเพาะที่จุดแข็งตัว : 1.572 กรัม/ซม³

จุดหลอมเหลว : 650 °C (923.15 K, 1202.0 °F)

จุดเดือด : 1107 °C (1380.15 K, 2024.6 °F)

การต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C : 4.4699 ไมโครโอม/ซม³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เทคนิคการตรวจสอบที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การตรวจวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [7]

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction : XRD) [20] XRD เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ทำให้อธิบายถึงองค์ประกอบต่างๆ ในวัสดุได้ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD สามารถที่จะหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้ว ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่างและค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้



รูปที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีเอกซ์ถูกปลดปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดกระทบบนผลึกจะเกิดการแตกกระจายโดยอะตอม เนื่องจากรังสีที่กระจายเป็นผลเนื่องมาจากการเร่งขึ้นและการหน่วงลงของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเคลื่อนที่โดยรังสีเอกซ์ไปกระตุ้นโดยจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับรังสีเอกซ์ที่ไปกระทบกับผลึกจะทำให้เกิดการหักเหขึ้น เมื่อความแตกต่างในระยะทางเคลื่อนที่โดยทั้งสองคลื่นหักเหเป็นเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่นเพื่อว่าคลื่นทั้งสองจะอยู่ในเฟสเดียวกันเส้นแนวระดับแกนระนาบของอะตอม

2.7.2 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [8]

Scanning electron microscope (SEM) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุเป็นต้น



รูปที่ 2.7 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

หลักการทำงานของ SEM [9]

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการหากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา แล้วลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) จากผงแมกนีเซียมบริสุทธิ์และผงซิลิกอนบริสุทธิ์ โดยการเผาขึ้นเฟสของ Mg_2Si มีทั้งสองเงื่อนไข โดยมีเงื่อนไขเวลาและเงื่อนไขอุณหภูมิเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเผาแคลไซน์ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าพร้อมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน ในส่วนถัดมานำเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดมาเผาซินเตอร์เพื่อขึ้นรูปโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ Mg_2Si และส่วนสุดท้ายคือนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมาเชื่อมขั้วไฟฟ้าและวัดค่าไฟฟ้าเบื้องต้นออกมา

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ผงแมกนีเซียม : Mg (20-30 mesh, reagent grade, 98%) Lot #MKBK6309V ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 ผงซิลิกอน : Si (-325 mesh, 99% trace) Lot#SHBJ8118 ผลิตโดยบริษัท Aldrich chemistry ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3 แก๊สอาร์กอน (Ar) ความบริสุทธิ์ 99.99 % บริษัท แพกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ถ้วยอะลูมินา

3.2.2 ถ้วยแกรไฟต์

3.2.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ U1241 C/U1242C 4-Digital Handheld Digital Multimeter, make in Malaysia, KEYSIGHT Technologies

3.2.4 6105 Resistivity adapter Keithley instrument, inc., Cleveland, Ohio, made in U.S.A

3.2.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared thermometer) รุ่น Banatech GM1651 -30°C ~ 165°C (-22°F~3002°F)

3.2.6 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น WANT® Electronic Balance, Capacity : 220 g, Volt : Work with 12 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnance) รุ่น M-Series
ผลิตโดยบริษัท CEP ประเทศไทย

3.2.8 Vernier caliper รุ่น Starnic 150 x 0.02 mm / 6" x 1 / 1000"

3.2.9 กล้องตรวจจับอินฟราเรดรุ่น E-40 บริษัท เทอร์โมสแกน ประเทศไทย

3.2.10 ท่อควอตซ์ทนอุณหภูมิสูงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm

3.2.11 เครื่องอัดไฮโดรลิกกึ่งอัตโนมัติขนาดแรงดัน 5000 psi ผลิตโดยบริษัท Risen Gold

3.2.12 เครื่องดูดควัน (Fume hood) ผลิตโดยบริษัท Design-alternative ประเทศไทย,
Model : FH150 SE/FRDT

3.2.13 ฟอर्सเพสแดนเลน (Forceps)

3.2.14 แท่งคนสาร ช้อนตวงสาร

3.2.15 ปีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร, 250 มิลลิลิตร และ 600 มิลลิลิตร

3.2.16 ครกหยกสำหรับบดสารเคมีชนิด agate

3.2.17 บล็อกอัดสารขึ้นรูปได้แก่บล็อกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง
10.0 ซม. และบล็อกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง 1.5 ซม.

3.2.18 กระดาษชั่งสารเคมี (Weighing Paper) ขนาด 10 x 10 เซนติเมตรยี่ห้อ Whiteman

3.2.19 เตาให้ความร้อน (Hot plate)

3.2.20 ระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน

3.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
(X-Ray Diffraction : XRD)

เพื่อที่จะบอกลักษณะโครงสร้างทางผลึกและเป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน เทคนิคนี้เป็นการตรวจสอบเพื่อยืนยันผลหลังจากการสังเคราะห์ว่าเป็นไปตามที่คาดหวังหรือไม่ ในการตรวจสอบครั้งนี้ได้ใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) รุ่น XRD-6100 ของบริษัท SHIMADZU ดังรูปที่ 3.1 ที่คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray Diffractometer รุ่น XRD-6100 ของบริษัท SHIMADZU

3.3.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry EDS) เพื่อบอกปริมาณที่เป็นองค์ประกอบของสารที่ตรวจสอบ ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่อง SEM ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ประเทศ Germany ดังรูปที่ 3.2

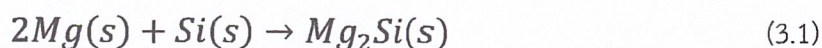


รูปที่ 3.2 Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ประเทศ Germany

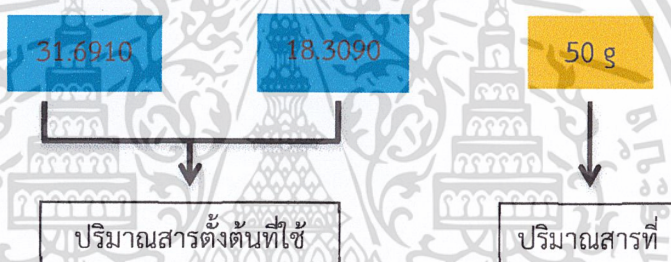
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์

3.4.1. กระบวนการเตรียมและสังเคราะห์เพื่อให้เกิด Mg_2Si นั้น เริ่มแรกต้องเตรียมสารตั้งต้น Mg บริสุทธิ์ 98% กับ Si บริสุทธิ์ 99% ทำการผสมตามสัดส่วนโมล (Stoichiometric ratio) จากการคำนวณปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียม (Mg) กับซิลิกอน (Si) ตามสมการต่อไป



3.4.2. จำนวนจำนวนสารที่ใช้ในการทดลองเป็นหน่วยกรัม โดยให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการเท่ากับ 50 กรัม



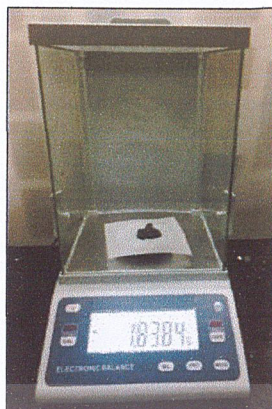
3.4.3. นำกระดาษชั่งสารเคมี (Weighing Paper) ไปวางบนเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.0001 เพื่อชั่งสารเคมีที่ได้จากการคำนวณสมการในข้อ 3.2 โดยใช้สารตั้งต้นแมกนีเซียม



รูปที่ 3.3 ชั่งสารแมกนีเซียมบนเครื่องชั่งดิจิตอล

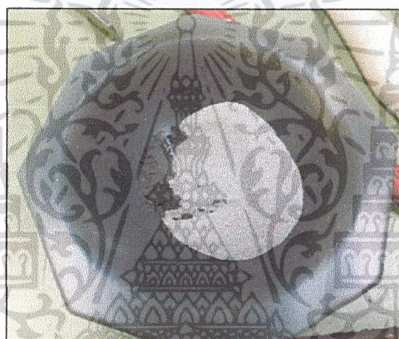
3.4.4. นำกระดาษชั่งสารเคมี (Weighing Paper) ไปวางบนเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.0001 เพื่อชั่งสารเคมีที่ได้จากการคำนวณสมการในข้อ 2 โดยใช้สารตั้งต้นซิลิกอน (Si)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชั่งสารซิลิกอนบนเครื่องชั่งดิจิทัล

3.4.5. จากนั้นนำสารที่ทำการชั่งเสร็จแล้วเทลงครกสำหรับบดสาร



รูปที่ 3.5 ผงแมกนีเซียมและซิลิกอนเตรียมบด

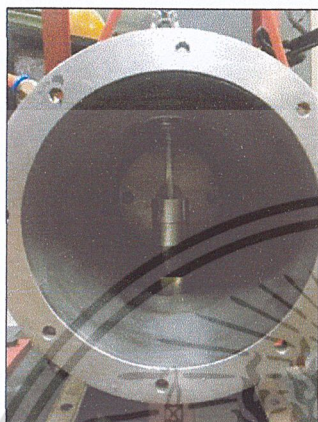
3.4.6. ทำการบดและกวนให้สารทั้งสองเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการบดย่อยเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะสังเกตเห็นว่าสารเป็นเนื้อเดียวกันนั้นคือ แมกนีเซียมซิลิไซด์ ($2\text{Mg} + \text{Si}$)



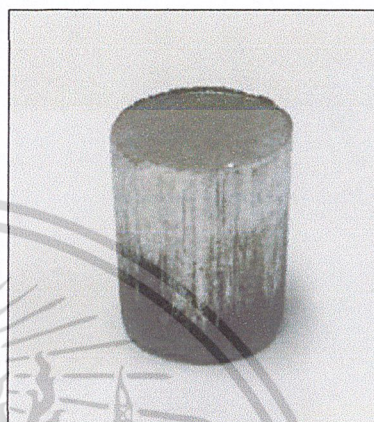
รูปที่ 3.6 ผงแมกนีเซียมและซิลิกอนที่บดเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.7. นำกระดาษชั่งสารไปวางบนเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 0.0001 ทำการชั่งสาร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แมกนีเซียมซิลิไซด์จำนวน 2 กรัม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8. หลังจากนั้นทำการเทสารจากกระตาดซังสารลงในแท่งบล็อกอัดสารที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร แล้วนำไปอัดที่เครื่องอัดไฮโดรลิกกึ่งอัตโนมัติโดยให้ความดันในการอัดที่ 4500 กิโลปาสกาล เป็นเวลา 5 นาที จะได้เม็ดสารดังรูป 3.7 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) แท่งบล็อกอัดสารที่มีผง Mg_2Si นำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกกึ่งอัตโนมัติ (ข) เม็ดสารตั้งต้น $2Mg + Si$ ที่ผ่านการผสมและอัดแล้ว

หมายเหตุ : ในการเตรียมสารเพื่อสังเคราะห์ Mg_2Si ไม่สามารถเตรียมด้วยวิธี Ball mill ได้ เนื่องจากว่า Mg ทำปฏิกิริยากับเมทิลแอลกอฮอล์ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ตามสมการเคมีต่อไปนี้



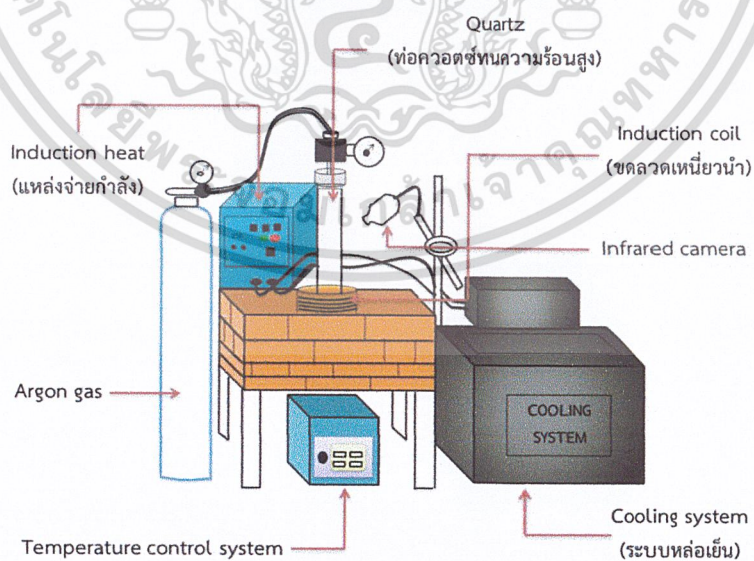
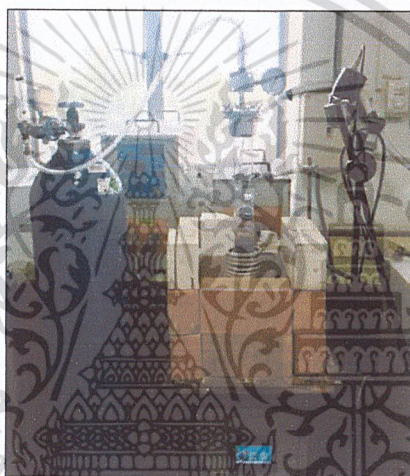
3.5 เงื่อนไขการเผาแคลไซน์ Mg_2Si สำหรับวิเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์

ในหัวข้อนี้จะเลือกวิธีการเผาแคลไซน์เม็ด Mg_2Si ที่ทำการอัดขึ้นรูปไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ใส่ไว้ในถ้วยแกรไฟต์สังเคราะห์จากระบบเตาแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว (Quench) ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน (Ar) ที่มีอัตราการไหล 10 L/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

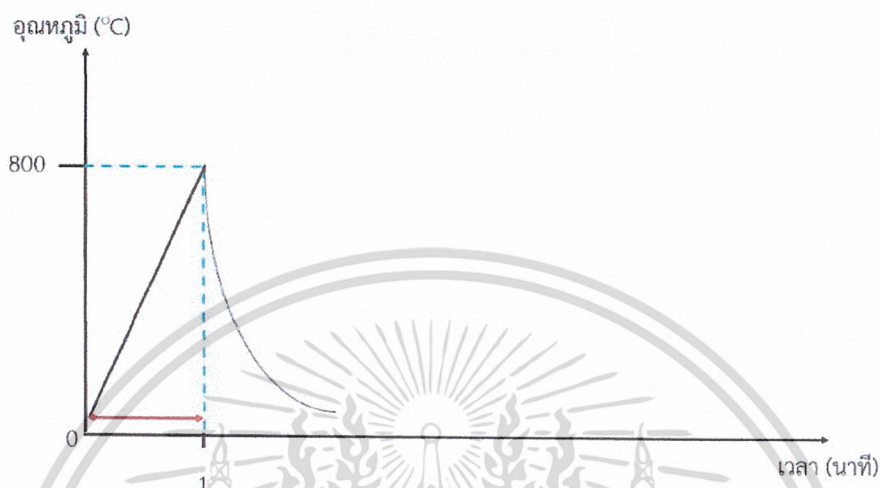


รูปที่ 3.8 ถ้วยแกรไฟต์ที่มีเม็ด Mg_2Si

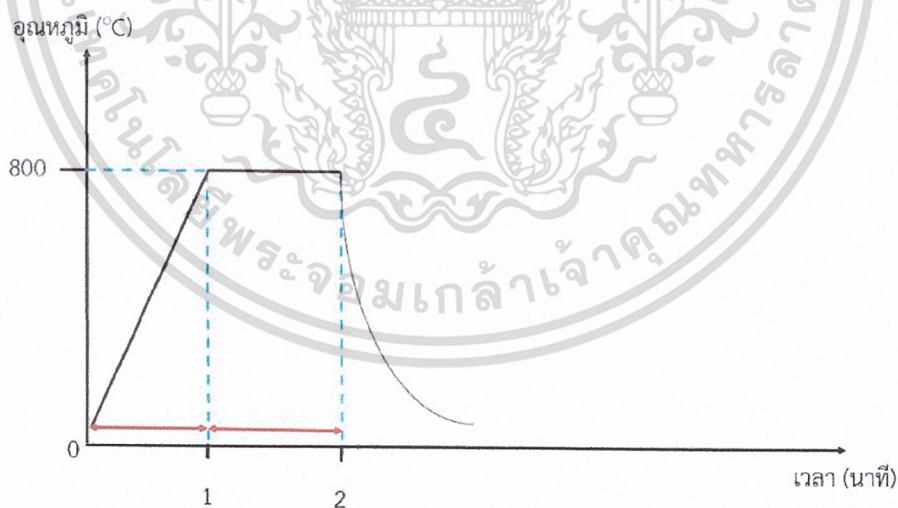


รูปที่ 3.9 ระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อาร์กอน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดสารตัวอย่างจำนวน 2 กรัม จะถูกนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C ในเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สูญญากาศในบรรยากาศอาร์กอนที่กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.1

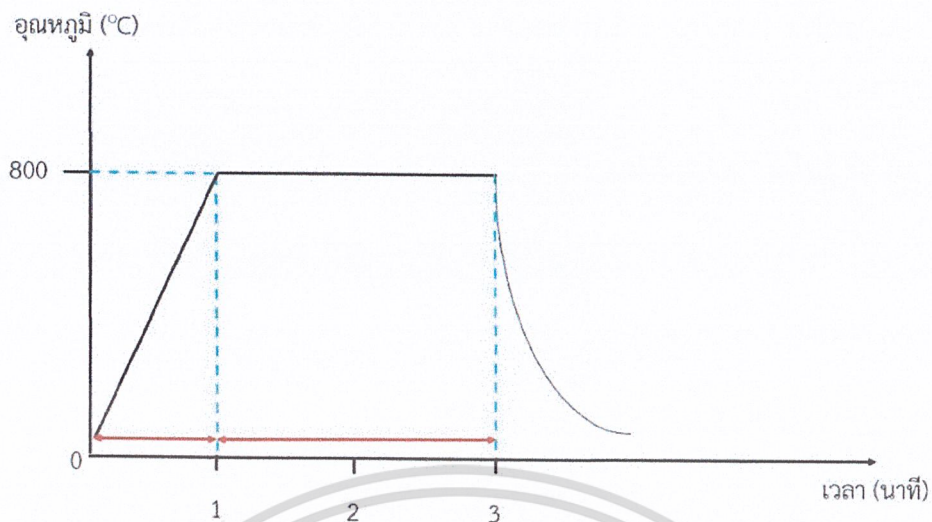


รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 1 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สูญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน

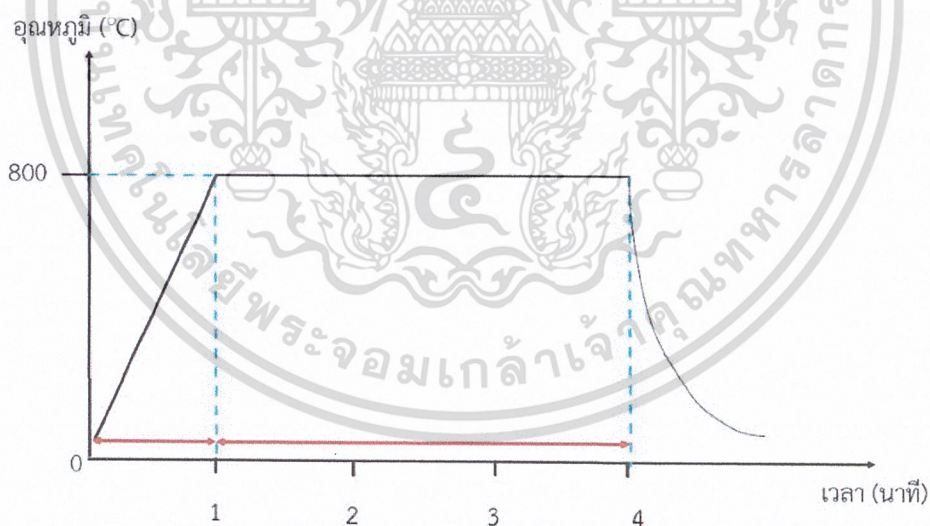


รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 2 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สูญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

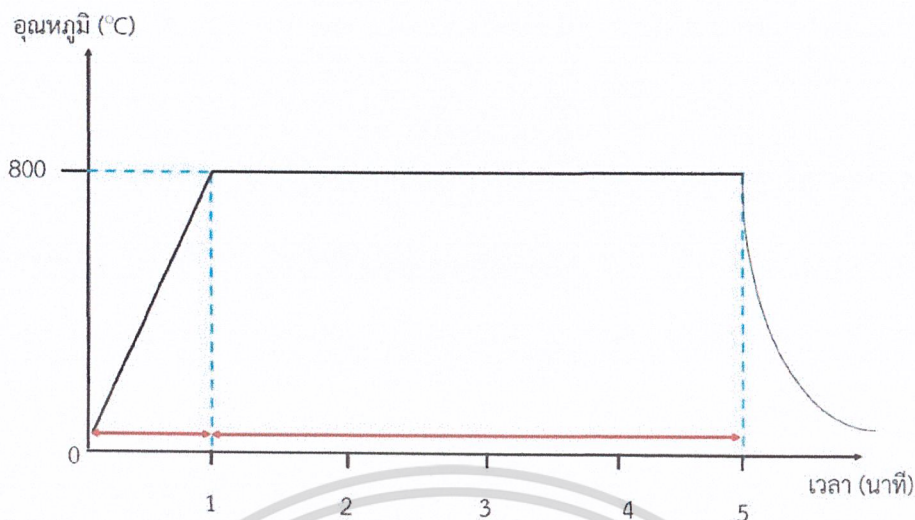


รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 3 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800°C กับเวลา 4 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 800 °C กับเวลา 5 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซต์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าพร้อมกับท่อควอตซ์สูญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน

ตารางที่ 3.1 แสดงบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงการเผาแคลไซต์ Mg_2Si ตามเงื่อนไขเวลาต่างๆ

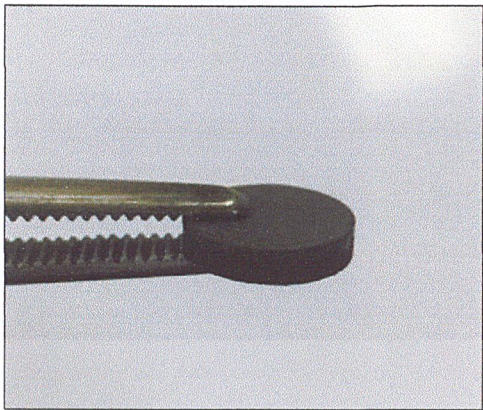
เงื่อนไขที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	รูปภาพ (หลังเผา)
1	800	1	
2		2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	รูปภาพ (หลังเผา)
3	800	3	
4		4	
5		5	

หมายเหตุ : ที่อุณหภูมิ 800°C ในการเผาแคลไซน์สังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si นี้ เป็นอุณหภูมิที่อ้างอิงโดยงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารประกอบ

จากนั้นนำผงของสารแต่ละเงื่อนไขมาบดให้ละเอียดเป็นเวลา 10 นาที แบ่งสารที่บดจนเป็นเนื้อเดียวกันมาตัวอย่างละ 0.3 กรัม มาอัดขึ้นรูปในบล็อกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ที่แรงอัด 4,500 กิโลปาสคาล แล้วนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่น (Density) ของสารประกอบเอกสารนี้ Mg_2Si ตามแสดงในตารางที่ 3.2 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 เม็ดสาร Mg_2Si ที่อัดขึ้นรูปแล้ว

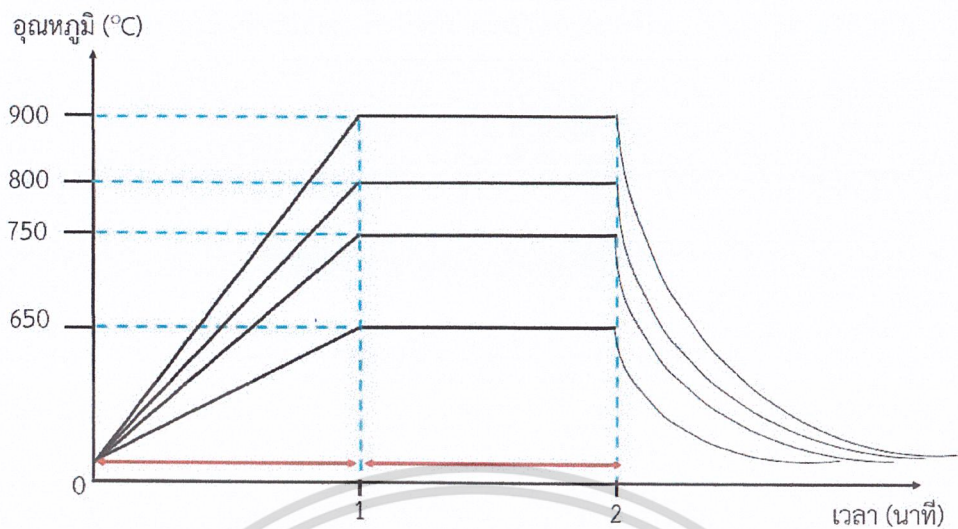
ตารางที่ 3.2 แสดงการหาค่าความหนาแน่นของสารประกอบ Mg_2Si

เงื่อนไขที่	อุณหภูมิในการเผา ($^{\circ}C$)	เวลา (min)	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความสูง (mm)	ความหนาแน่น (g/cm^2)
1	800	1	0.5	10.20	4.62	1.3687
2		2	0.5	10.19	3.80	1.6145
3		3	0.5	10.20	4.07	1.5042
4		4	0.5	10.19	3.97	1.5451
5		5	0.5	10.18	4.06	1.5138

หมายเหตุ : ค่าความหนาแน่น (Density) ของสารประกอบ Mg_2Si เท่ากับ 1.99 g/cm^2

จากผลการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารประกอบ Mg_2Si จะเห็นว่าเงื่อนไขที่เวลา 2 นาที มีค่า Density ใกล้เคียงกับค่าทฤษฎีมากที่สุด จากนั้นจึงนำเวลาดังกล่าวไปใช้ในการหาเงื่อนไขอุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ดังตารางที่ 3.3 เป็นการหาเงื่อนไขอุณหภูมิในการเผาให้ได้เฟสของสารประกอบ Mg_2Si จากเม็ดสารที่อัดขึ้นรูปไว้ในหัวข้อที่ 3.4 โดยจะทำการเผาในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650, 750, 800 และ 900 องศา เป็นเวลา 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงอุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C กับเวลา 2 นาทีที่ใช้ในการเผาแคลไซด์ของเม็ดสารตั้งต้น $2\text{Mg} + \text{Si}$ ในระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สูญญากาศในบรรยากาศอาร์กอน

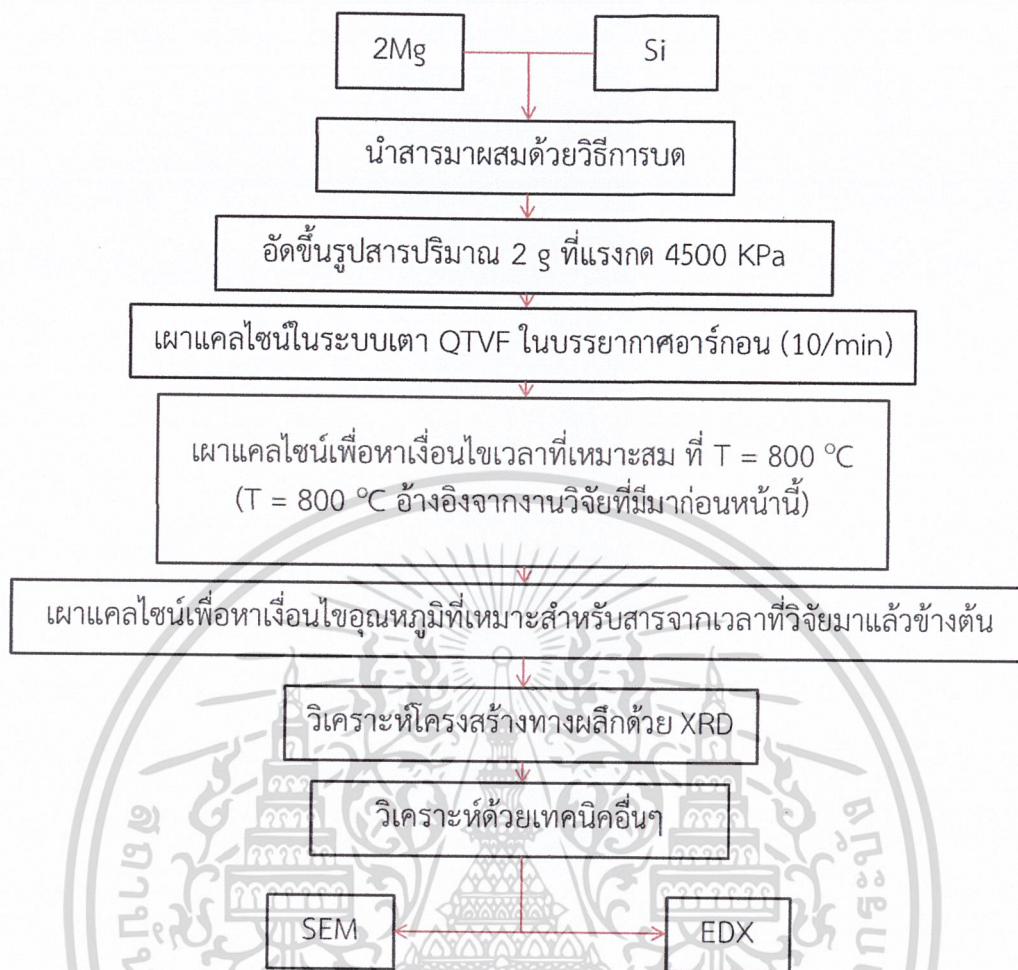
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการเผาแคลไซน์ Mg_2Si ตามเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ

เงื่อนไขที่	เวลา (min)	อุณหภูมิในการเผา (°C)
1	2	650
2	2	750
3	2	800
4	2	900

หลังจากที่ผ่านการแคลไซน์นำสารทั้ง 4 เงื่อนไขมาทำการบดให้ละเอียดแล้วส่งตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับว่าในวิธีการใดที่ทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si ขึ้นตามที่คาดหวัง พร้อมทั้งนำไปตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope : SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมและวิเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si

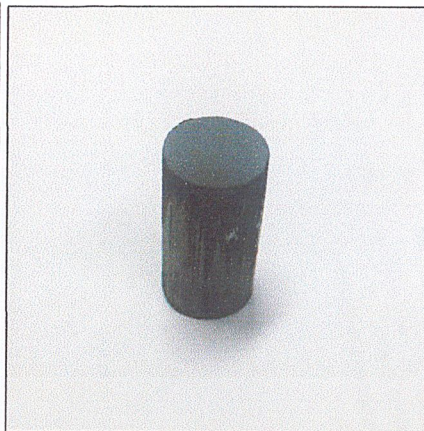
3.6 การเผาซินเตอร์ Mg_2Si เตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับวัดค่าไฟฟ้าเบื้องต้น

หลังจากที่ทำการหาเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์เสร็จ ในหัวข้อนี้จะเลือกวิธีการเผาซินเตอร์เม็ด Mg_2Si โดยมีระบบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศ อาร์กอนและระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน เมื่อได้ Mg_2Si จากหัวข้อที่ 3.5 แล้ว แบ่งสารออกมาปริมาณ 2 กรัม นำไปใส่บล็อกอัดสารที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จากนั้นอัดขึ้นรูปที่แรงกด 4,500 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 5 นาที จะได้เม็ดสารดังรูปที่ 3.18 (ข) เสร็จแล้วนำไปเผาซินเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศ อาร์กอนดังรูป 3.4 (ข) โดยใช้อุณหภูมิที่ 650 , 750 และ 800 °C และใช้เงื่อนไขเวลาที่ได้จากหัวข้อที่ 3.5 ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



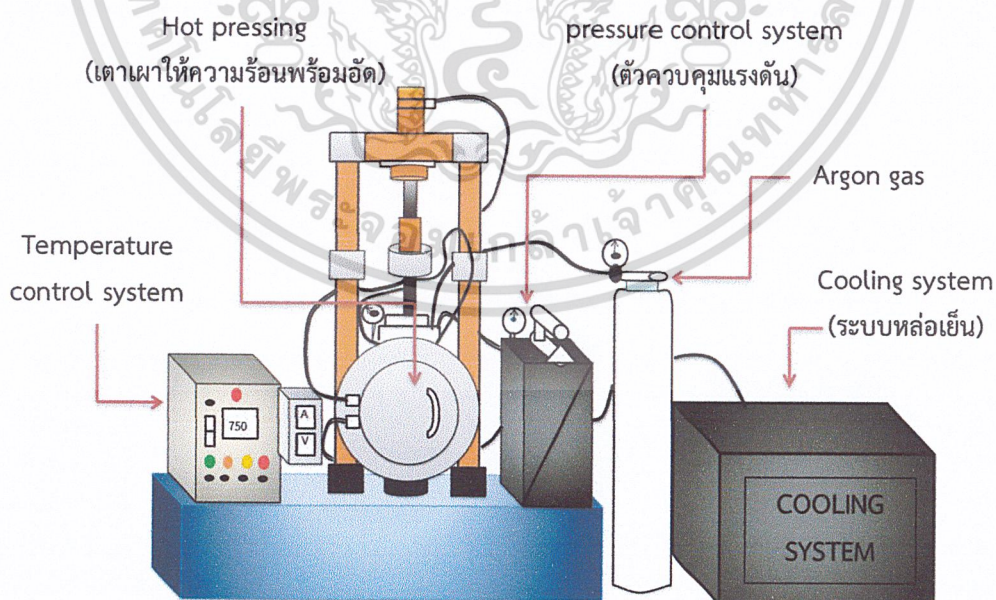
(ก)



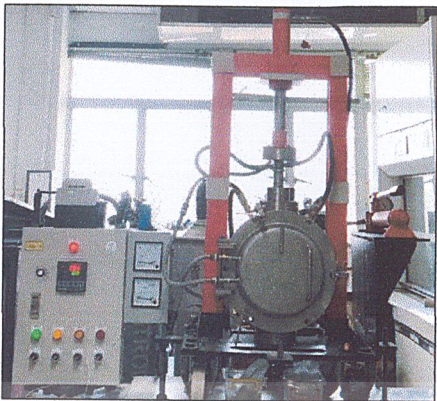
(ข)

รูปที่ 3.18 (ก) เเผะซินเตอร์ในระบบเตาเผะให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน (ข) เม็ดสาร Mg_2Si ที่อัดขึ้นรูป

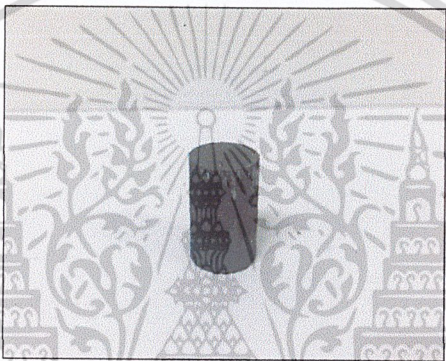
แล้วนำสาร Mg_2Si อีกส่วนในปริมาณ 2 กรัม ดังรูปที่ 3.18 (ข) มาทำการเผะซินเตอร์ที่ระบบเตาเผะแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ แรงอัด 4,500 กิโลปาสกาลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ดังรูปที่ 3.19 (ก) จะได้เม็ดสาร Mg_2Si ที่ทำการเผะซินเตอร์ดังรูปที่ 3.19 (ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

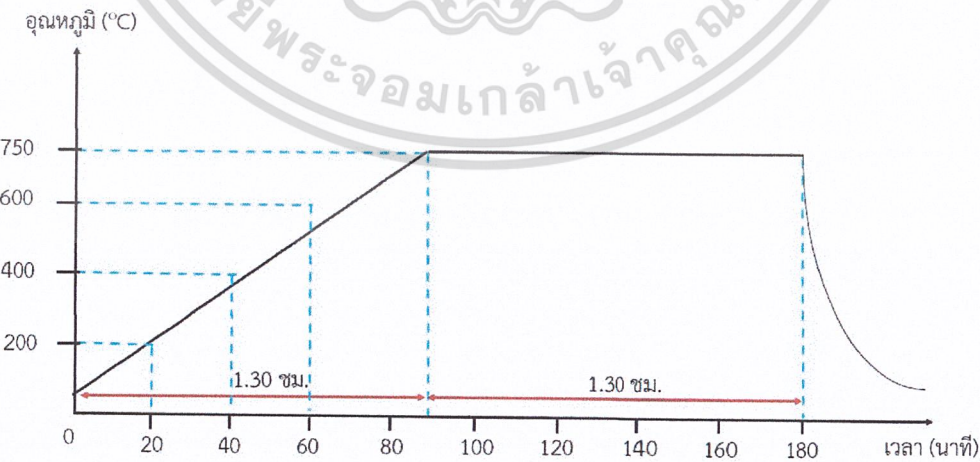


(ก)

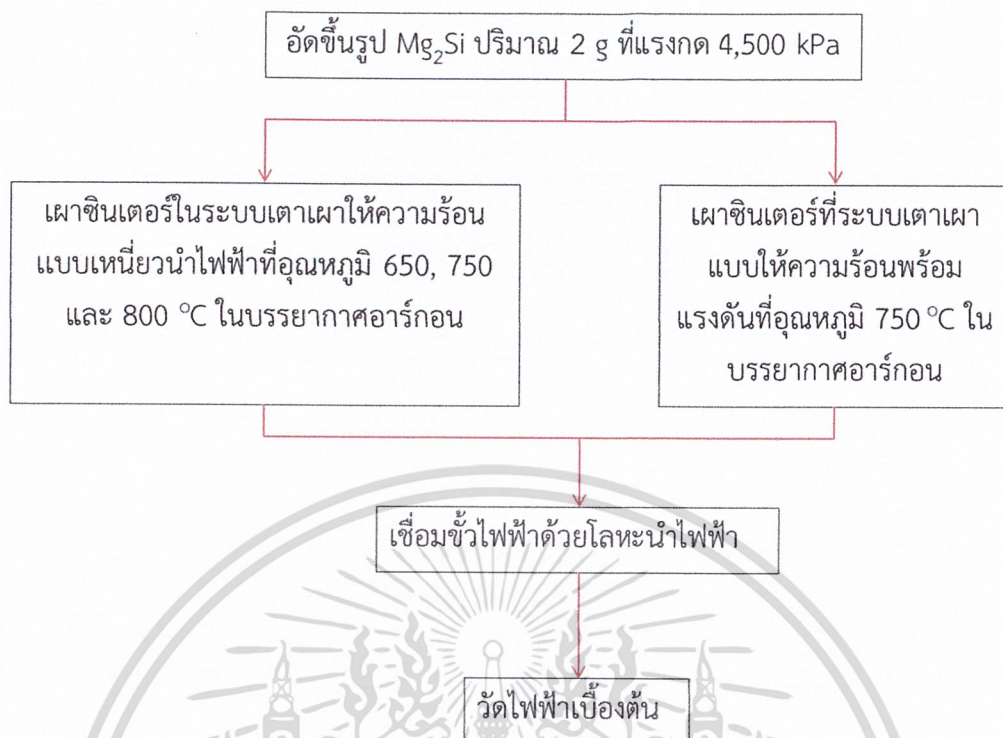


(ข)

รูปที่ 3.19 (ก) ระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน (ข) แท่งโมดูล Mg_2Si หลังจากการเผาซินเตอร์



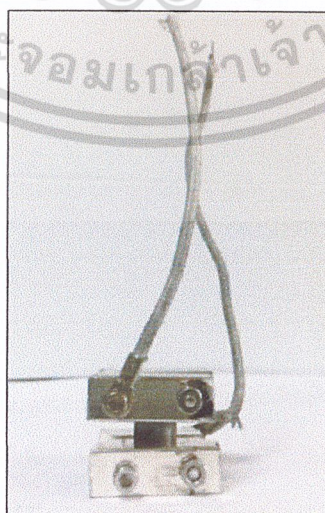
รูปที่ 3.20 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ระบบเตาเผาแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมและวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si

3.7 ขั้นตอนในการเชื่อมขั้วไฟฟ้าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและการวัดไฟฟ้าเบื้องต้น

เมื่อได้แท่งโมดูล Mg_2Si จากการเผาซินเตอร์ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนและระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอนแล้ว จากนั้นนำแท่งโมดูล Mg_2Si มาเชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะนำไฟฟ้างดรูปที่ 3.21 เพื่อนำไปวัดค่าไฟฟ้าเบื้องต้นเปรียบเทียบการเผาซินเตอร์ในสองระบบที่กล่าวข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.22 โมดูล Mg_2Si ที่เชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะนำไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำโมดูลที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้าเสร็จแล้วมาทำการวัดไฟฟ้าเบื้องต้น โดยใช้แหล่งความร้อนจากเตาให้ความร้อน (hot plate) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง - 450°C ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.23 อุปกรณ์ในการวัดไฟฟ้าเบื้องต้น

หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพไฟฟ้าเบื้องต้นระหว่างการเผาซินเตอร์ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนและระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและอภิปรายผลที่ได้ โดยในส่วนแรกเป็นผลของเงื่อนไขเวลาและเงื่อนไขของอุณหภูมิใช้ในการสังเคราะห์ที่ทำให้เกิดเฟสของแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) รวมไปถึงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกและวิเคราะห์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในส่วนที่สองเป็นการเผาซินเตอร์เพื่อขึ้นรูปมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ Mg_2Si จากการเปรียบเทียบการเผาในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนและระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอน ส่วนสุดท้ายเป็นผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ Mg_2Si ทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงได้ในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

4.1 ผลการหาเงื่อนไขการเผาแคลไซน์ในการสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์

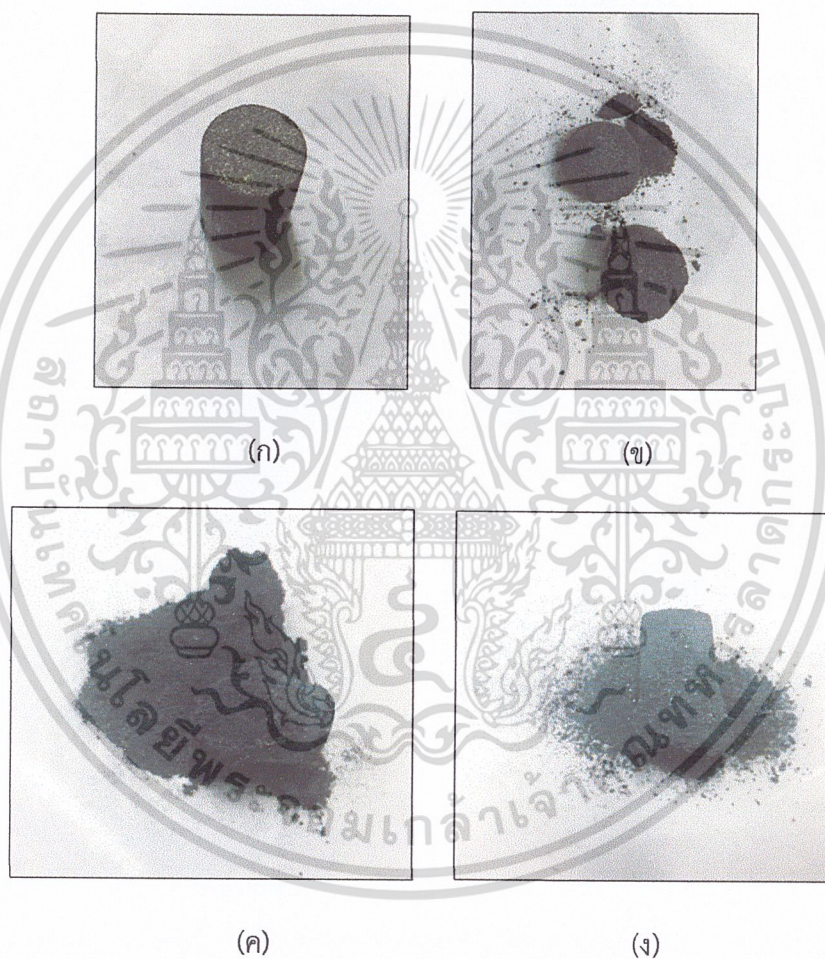
เริ่มแรกได้ทำการหาเงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เพื่อให้ได้เฟสของ Mg_2Si โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ $800^{\circ}C$ ซึ่งอุณหภูมินี้ที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นอุณหภูมิที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารประกอบ Mg_2Si เผาแคลไซน์ในเงื่อนไขเวลา

ชื่อสาร	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ($^{\circ}C$)	เวลา (นาที่)	ค่าความหนาแน่น (Density) g/cm^2
Mg_2Si	800	1	1.3687
		2	1.6145
		3	1.5042
		4	1.5451
		5	1.5138

แล้วนำมาทำการสังเคราะห์เงื่อนไขเวลา โดยมีเวลาที่ใช้ในการเผาดังนี้ 1, 2, 3, 4, และ 5 นาที่ แล้วเอกลำนำ้ไปหาค่าความหนาแน่นออกมาดังตารางที่ 4.1จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เวลา 2 นาที่ มีค่าค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นเท่ากับ 1.6145 g/cm^3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทฤษฎีมากที่สุด (ค่าความหนาแน่นของ $\text{Mg}_2\text{Si} = 1.99 \text{ g/cm}^3$) หลังจากนั้นนำเงื่อนไขเวลาที่ได้มาทำการเผาแคลไซน์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอน โดยเราอยากทราบเงื่อนไขว่าเมื่อเวลาคงที่แล้ว อุณหภูมิต่างกันจะทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si หรือไม่ จึงทำการกำหนดเงื่อนไขการเผาที่มีอุณหภูมิดังนี้ 650, 750, 800 และ 900°C พบว่าเมื่อดำเนินการผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C ในเวลา 2 นาที มีผงเป็นสีน้ำเงินเข้มหรือสีกรมท่าซึ่งมีลักษณะเหมือนกับ Mg_2Si ดังรูปที่ 4.1(ค)



รูปที่ 4.1 (ก) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650°C ในเวลา 2 นาที

(ข) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C ในเวลา 2 นาที

(ค) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C ในเวลา 2 นาที

(ง) ผง Mg_2Si หลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C ในเวลา 2 นาที

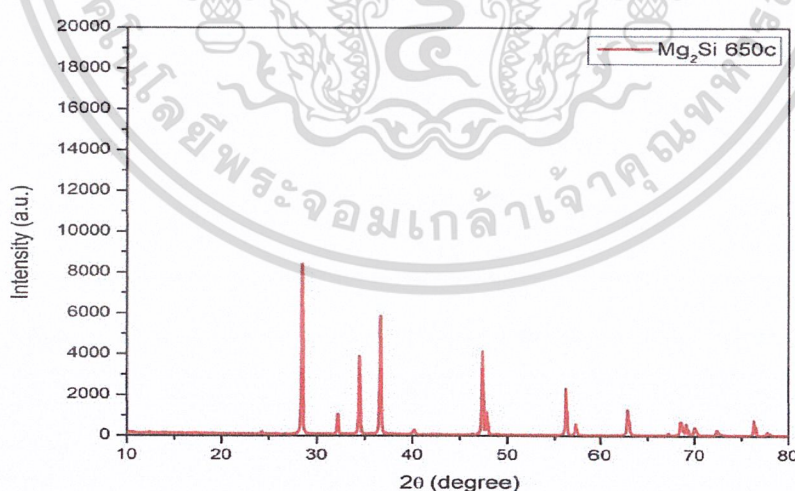
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่อุณหภูมิ 650 และ 750°C ในเวลา 2 นาที มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลปนอยู่ และที่อุณหภูมิ 900°C ในเวลา 2 นาที มีลักษณะเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 800°C แต่มีสีน้ำตาลปนอยู่บางส่วน เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของสาร หลังจากที่ทำกระบวนการการสังเคราะห์ที่ทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si แล้วก็ได้ทำการตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) และตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)

ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบ Mg_2Si ที่สังเคราะห์จากการเผาแคลไซด์ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900 °C เป็นเวลา 2 นาที โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

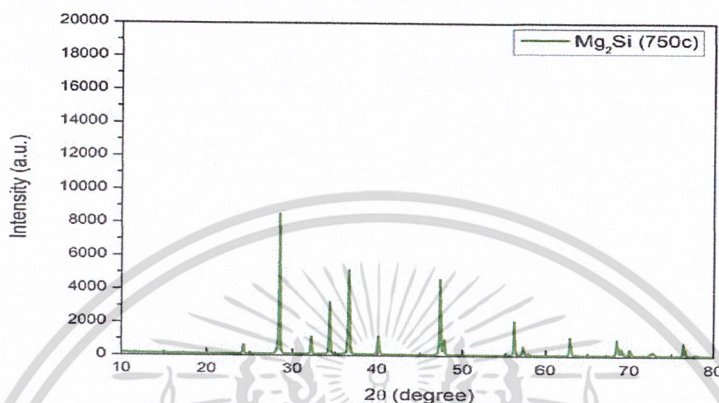
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซด์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.2 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซด์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที

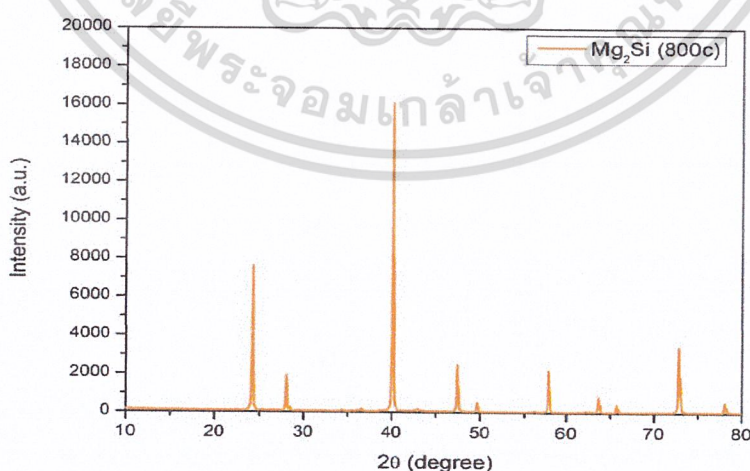
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



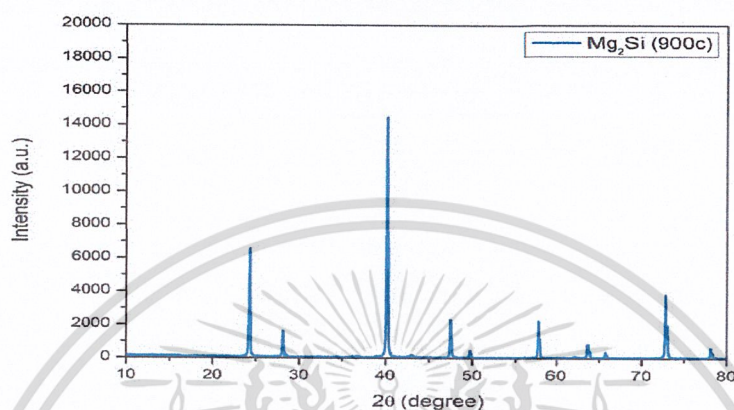
รูปที่ 4.3 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที

4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



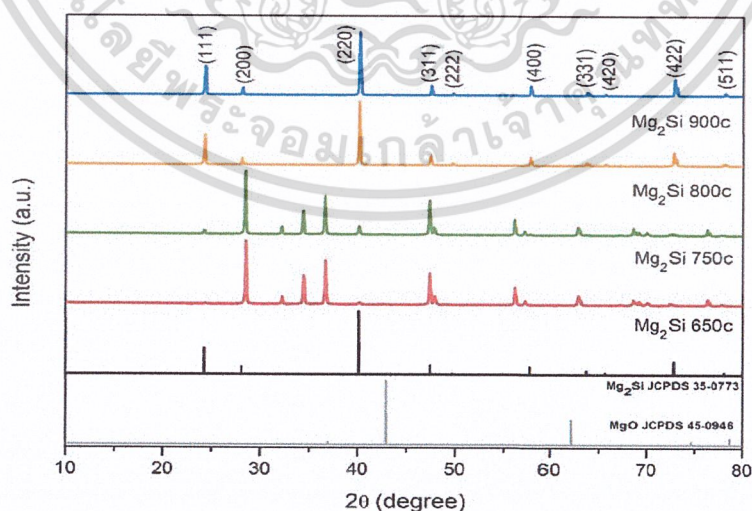
รูปที่ 4.4 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที

4.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.5 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที

4.2.5 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.6 XRD ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนในแต่ละระนาบของโครงสร้างผลึก Mg_2Si

ลำดับที่	มุมการเลี้ยวเบน , 2θ (องศา)	$\sin\theta$	ระนาบ		
			h	k	l
1	24.32	0.21	1	1	1
2	28.16	0.24	2	0	0
3	40.20	0.34	2	2	0
4	47.48	0.40	3	1	1
5	49.76	0.42	2	2	2
6	58.08	0.49	4	0	0
7	63.88	0.51	3	3	1
8	65.76	0.54	4	2	0
9	72.96	0.59	4	2	2
10	78.16	0.63	5	1	1

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ Mg_2Si การเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนียวนำภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที่ ผลแสดงให้เห็นว่าในการสังเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 $^{\circ}C$ ระนาบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วย (111) , (200) , (220) , (311) , (222) , (400) , (331) , (420) , (422) และ (511) สอดคล้องกับพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดมุม 2θ ได้แก่ 24.32 , 28.16 , 40.20 , 47.48 , 49.76 , 58.08 , 63.88 , 65.76 , 72.96 และ 78.16 องศา ตามลำดับ ซึ่งลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนดังกล่าวพีคที่ได้นั้นอ้างอิงจากชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 35-0773 และจากการเตรียมผลึก Mg_2Si ที่อุณหภูมิ 650 และ 750 $^{\circ}C$ มีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 35-0773 เช่นกัน แต่พีคของการเลี้ยวเบนที่ 2θ ได้แก่ 36.93 เกิดขึ้นนั้นตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน MgO ที่ได้นั้นอ้างอิงจากชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 45-0946 ซึ่งที่อุณหภูมิ 650 และ 750 $^{\circ}C$ นี้ทำให้เกิดเฟสของ

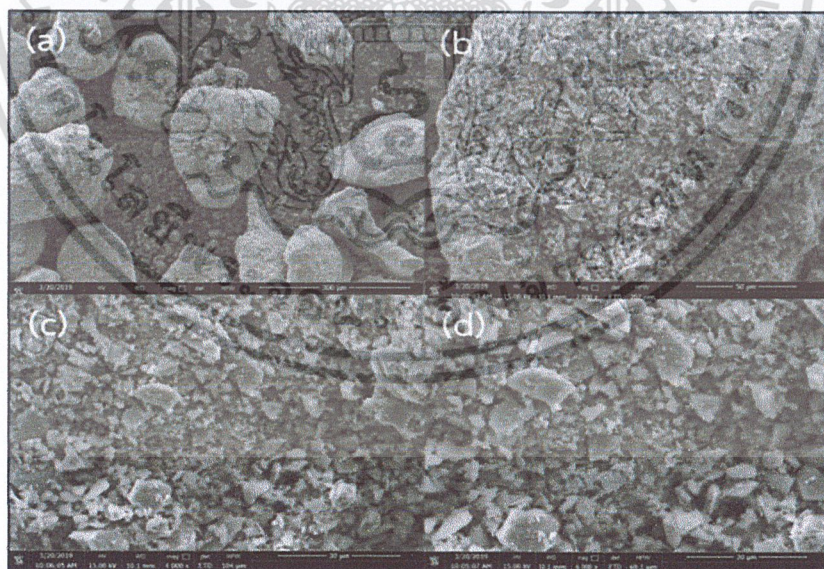
แมกนีเซียมออกไซด์ ($2MgO$) ที่ไม่ต้องการ โดยจุดหมายของโครงการพิเศษนี้ต้องการสังเคราะห์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าสารประกอบ Mg_2Si บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ในระบบเตาเผาให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนแบบเหนี่ยวนำภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C ทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si บริสุทธิ์ได้ หลังจากที่เราบดถึงเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si ได้แล้วก็ทำการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ดังหัวข้อที่ 4.3

4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบ Mg_2Si ที่สังเคราะห์จากการเผาแคลไซน์ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 900 °C เป็นเวลา 2 นาที่ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

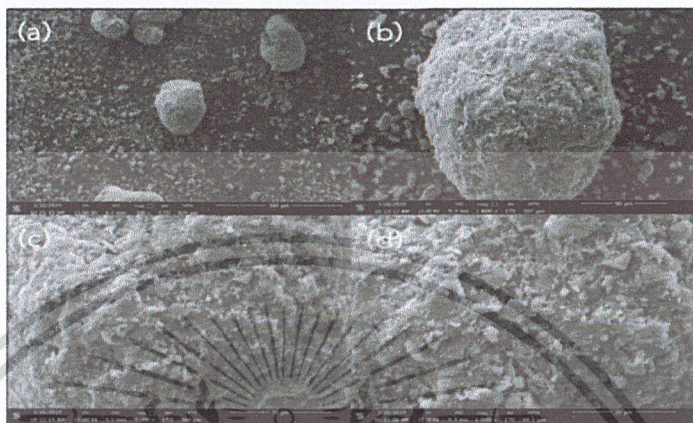
4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 นาที่ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.7 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 นาที่ ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b) 4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า

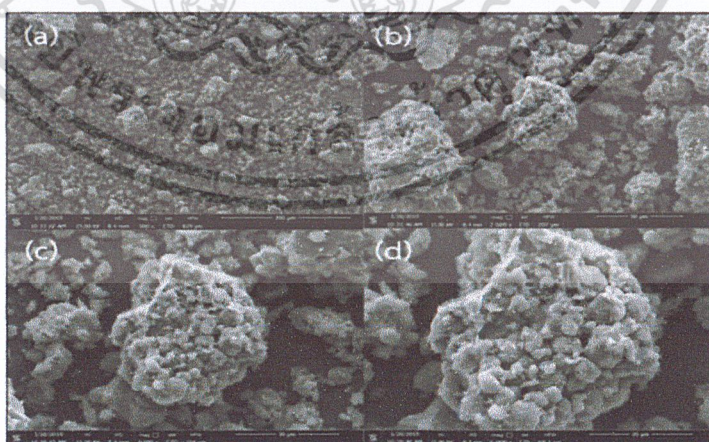
(d)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



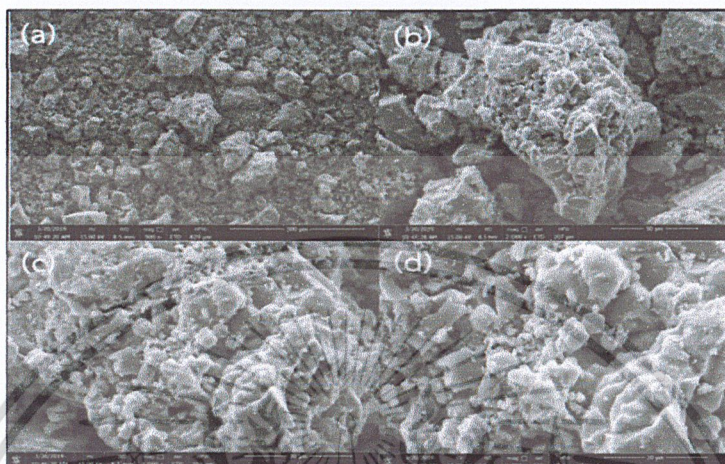
รูปที่ 4.8 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b) 4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d)

4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



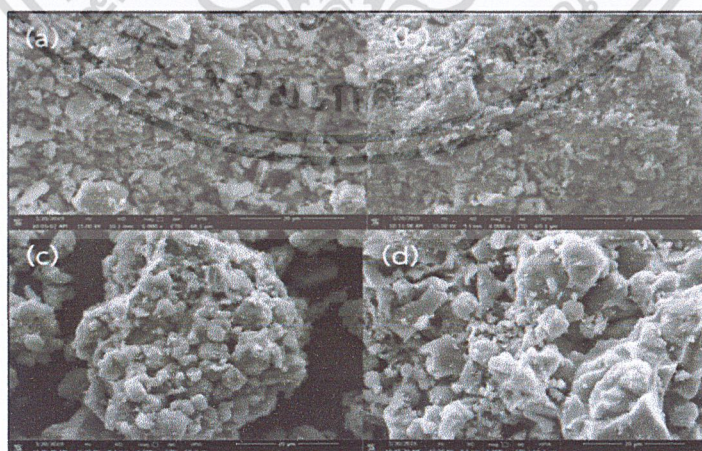
รูปที่ 4.9 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b) 4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (d) ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.10 SEM ของโครงสร้างสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) 2,000 เท่า (b) 4,000 เท่า (c) และ 6,000 เท่า (d)

4.3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน

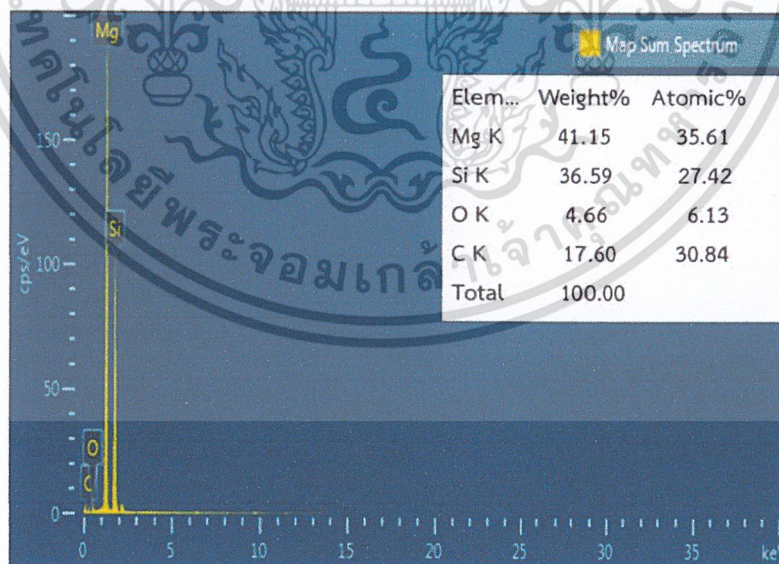


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์ที่เตรียมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไปสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าได้ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 950°C เป็นเวลา 2 นาที ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 4.8(a) และ 4.9(b) เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 650 และ 750°C พบว่ามีลักษณะโครงสร้างยังไม่เป็นระเบียบ กระจายตัวกันอยู่ยังไม่เข้ากันดีของสาร และมีขนาดความกว้างประมาณ 2 – 12 μm และขนาดความกว้างประมาณ 2 – 5 μm ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.10(c) และ 4.11(d) เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ขึ้นฟีดของสาร พบว่ามีลักษณะโครงสร้างนั้นเกาะกลุ่มมากขึ้น มีการรวมตัวของสารได้ดีขึ้น และมีขนาดความกว้างประมาณ 2 – 10 μm และมีขนาดความกว้างประมาณ 2 – 9 μm ตามลำดับ

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างด้วยสเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry EDS) ของตัวอย่างที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

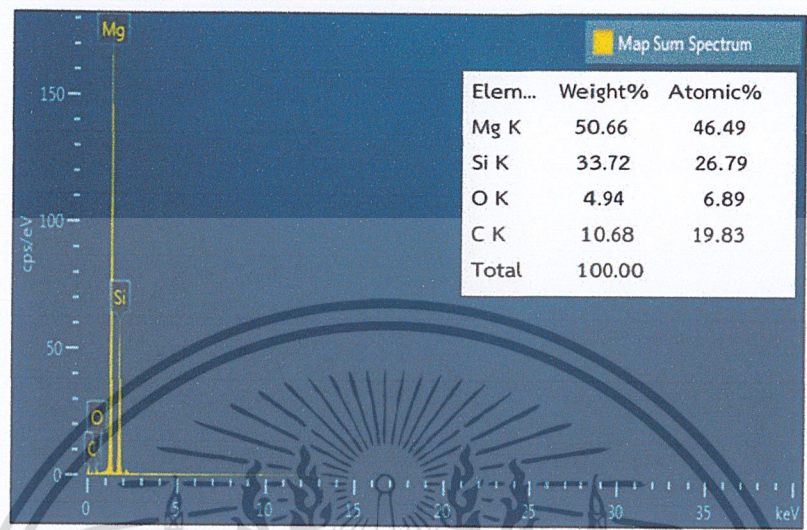
4.4.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 นาที

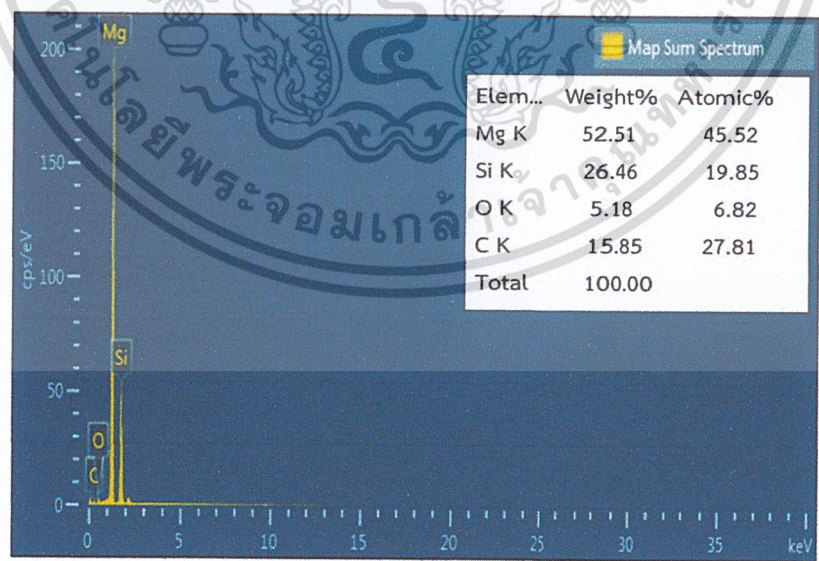
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg₂Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 นาที

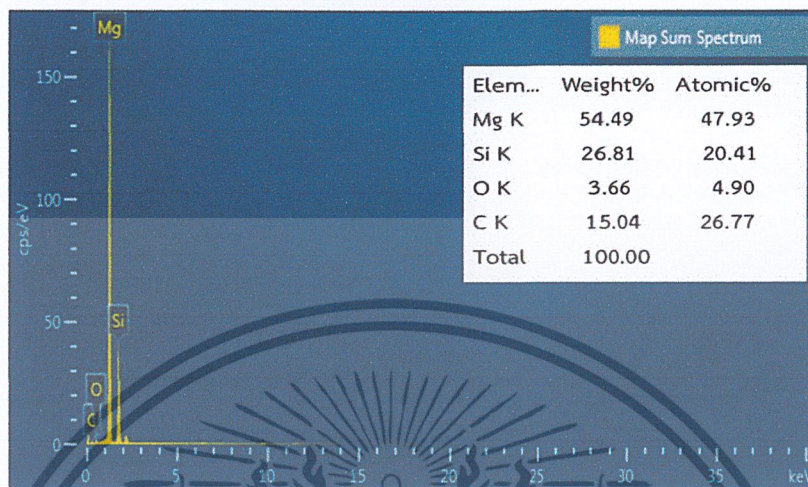
4.4.3 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg₂Si จากการเผา

แคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDX ของสารประกอบ Mg_2Si จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 นาที

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์จากการเผาแคลไซน์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 750 800 และ 950°C เป็นเวลา 2 นาที ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอนด้วยสเปกตรัมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry EDS) จากรูป 4.12 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 650°C พบว่ามีปริมาณธาตุ Mg : Si : O : C เป็น 41.15% : 36.59% : 4.66% : 17.60% รูป 4.13 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 750°C พบว่ามีปริมาณธาตุ Mg : Si : O : C เป็น 50.66% : 33.72% : 4.94% : 10.68% รูป 4.14 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 800°C พบว่ามีปริมาณธาตุ Mg : Si : O : C เป็น 52.51% : 26.46% : 5.18% : 15.85% และรูป 4.15 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 900°C พบว่ามีปริมาณธาตุ Mg : Si : O : C เป็น 54.49% : 26.81% : 3.66% : 15.04% ดังนั้นสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C ทั้งสองมีค่าเฉลี่ยของธาตุ Mg : Si เฉลี่ยโดยประมาณ 2 : 1 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนโมลของ Mg_2Si โดยในการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นถึงธาตุ O และ C แต่มีในปริมาณที่น้อย

หลังจากที่ทำการหาเงื่อนไขสังเคราะห์และวิเคราะห์สารประกอบ Mg_2Si ภายใต้บรรยากาศ

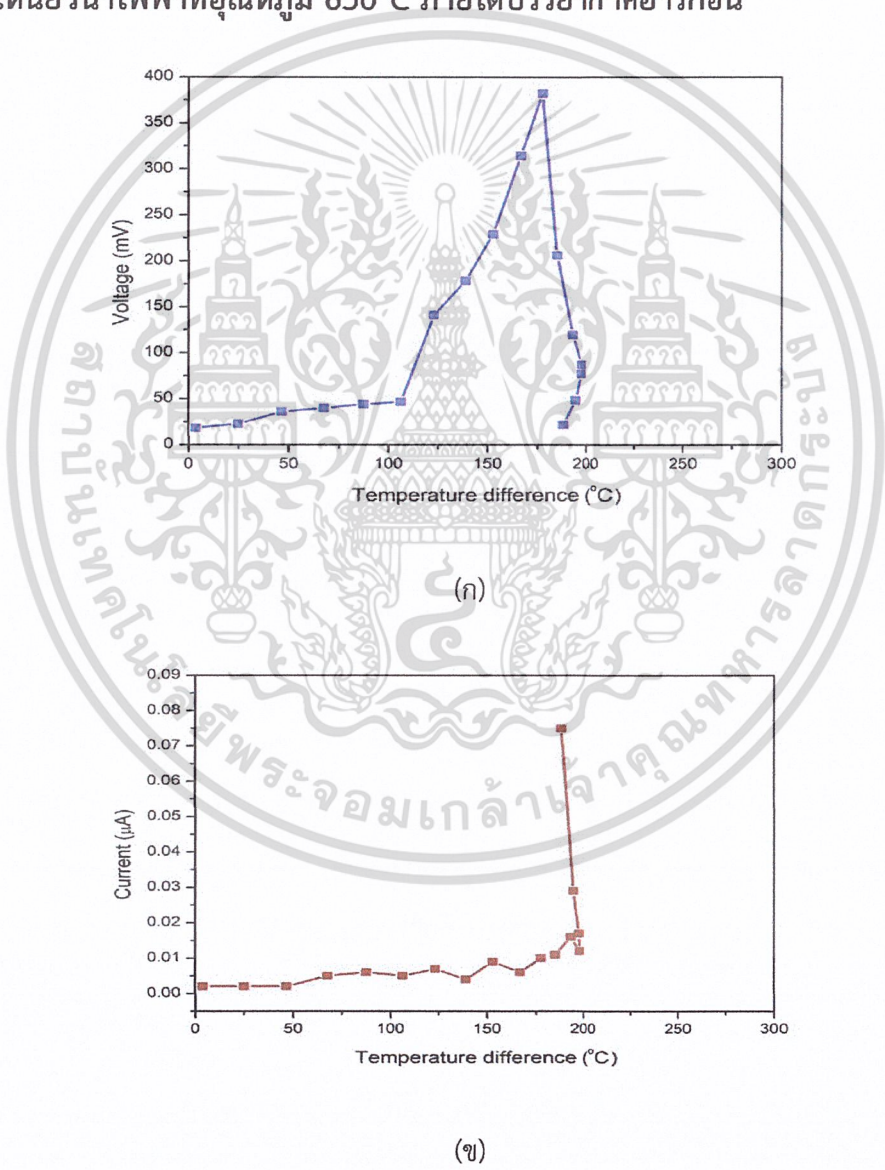
อาร์กอนด้วยเทคนิคต่างๆ สรุปได้ว่าเงื่อนไขที่จะนำไปเผาขึ้นรูป (sintering) ต่อไปคือสารประกอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า Mg_2Si ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 นาที

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน

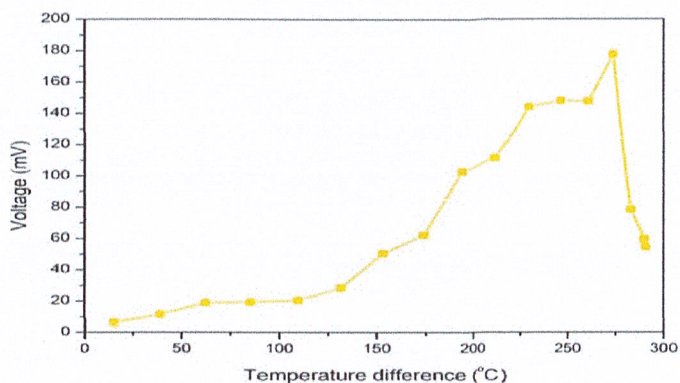
ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูล Mg_2Si ที่สังเคราะห์จากการเผาซินเตอร์ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650 และ 750 °C และระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650 °C

4.5.1 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 650 °C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.16 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V)

ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน



(ก)



(ข)

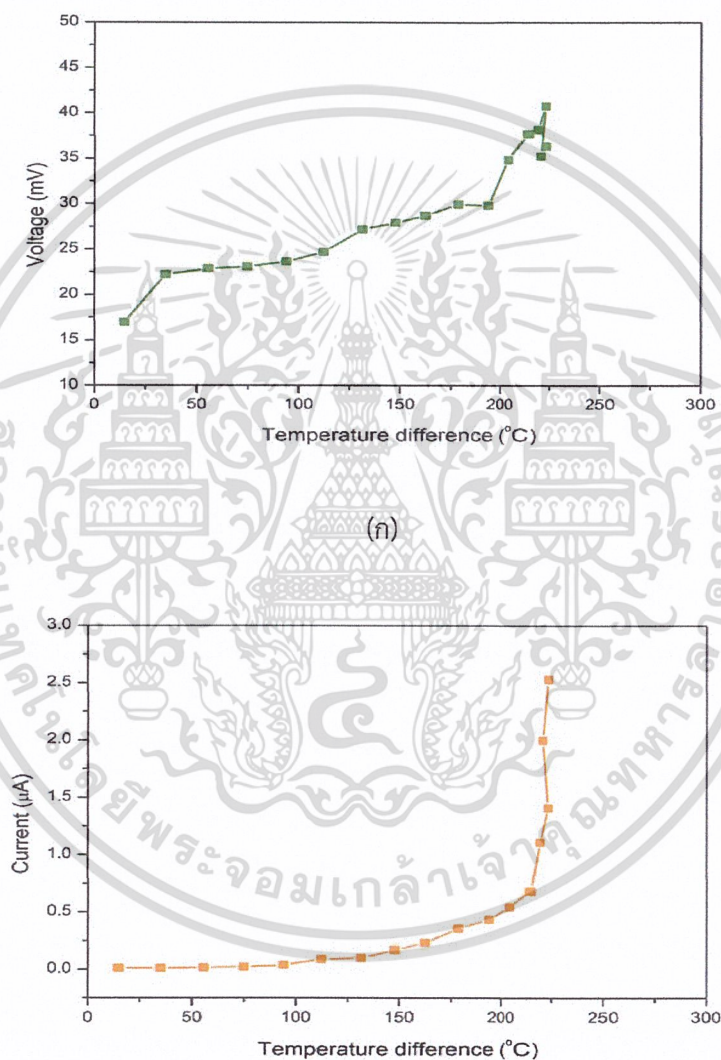
รูปที่ 4.17 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน

ผลการทดสอบไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si เฝ้าซิงเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $650^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบไม่หุ้มฉนวน กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ (V) และความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับกระแสไฟฟ้า (I) พบว่าเมื่อความต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ (V) จะเห็นว่าเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นประมาณ 382.25 mV หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องการ และสำหรับโมดูล Mg_2Si เฝ้าซิงเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความ

เอกสารนี้เรียนเอกสารเกี่ยวกับงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $650^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบหุ้มฉนวน พบว่ากราฟมีค่าไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกันกับมอดูลแบบไม่หุ้มฉนวน เมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นประมาณ 157.83 mV หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งถือว่ายังไม่เห็นแนวโน้มของความเป็นไปได้ในเงื่อนไขอุณหภูมิ 650°C มากนัก

4.5.2 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 750°C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



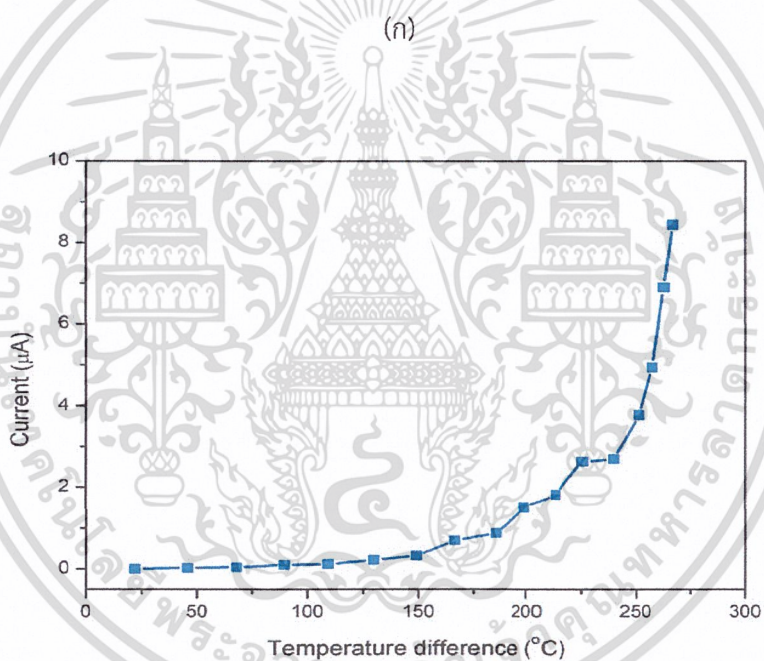
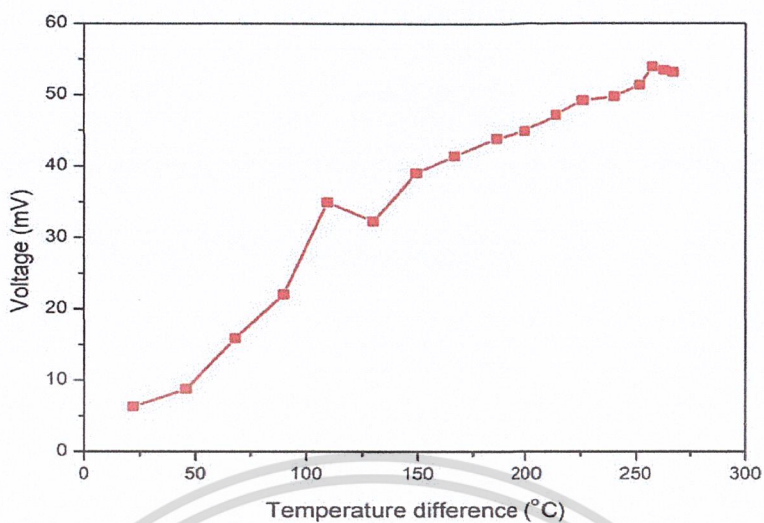
(ข)

รูปที่ 4.18 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของ

โมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และ

กระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบไม่หุ้มฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน

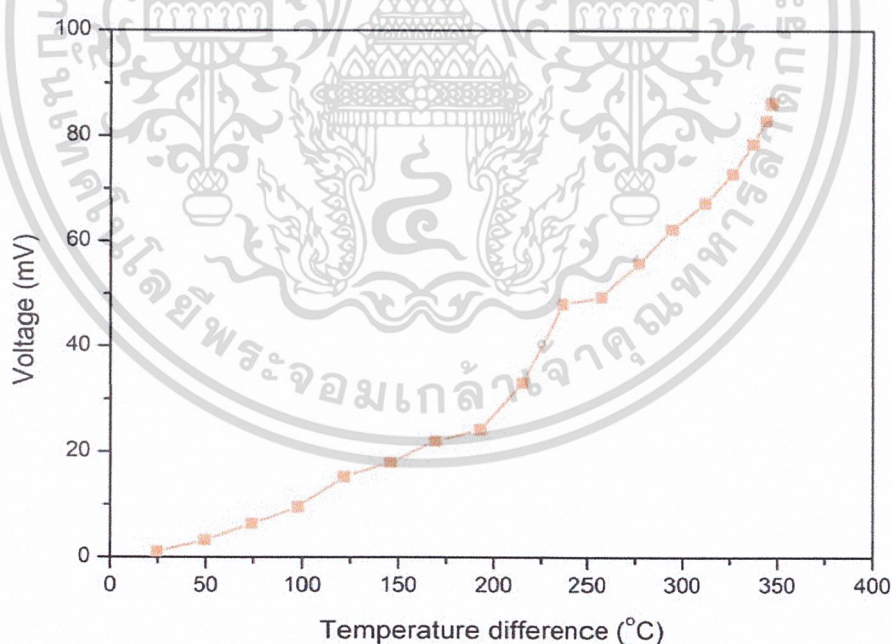
ผลการทดสอบไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si เฝ้าซินเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบ

เหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $750^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบไม่หุ้มฉนวน กราฟแสดงค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ (V) และความต่างของอุณหภูมิ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ΔT) กับกระแสไฟฟ้า (I) พบว่าเมื่อความต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ (V) จะเห็นว่าเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นประมาณ 40.76 mV หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มลดลง และสำหรับโมดูล Mg_2Si เสาขึ้นเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $750^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบหุ้มฉนวน พบว่ากราฟมีลักษณะแนวโน้มของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีกว่าโมดูลแบบไม่หุ้ม เพราะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 53.93 mV ที่ตำแหน่งอุณหภูมิเดียวกัน

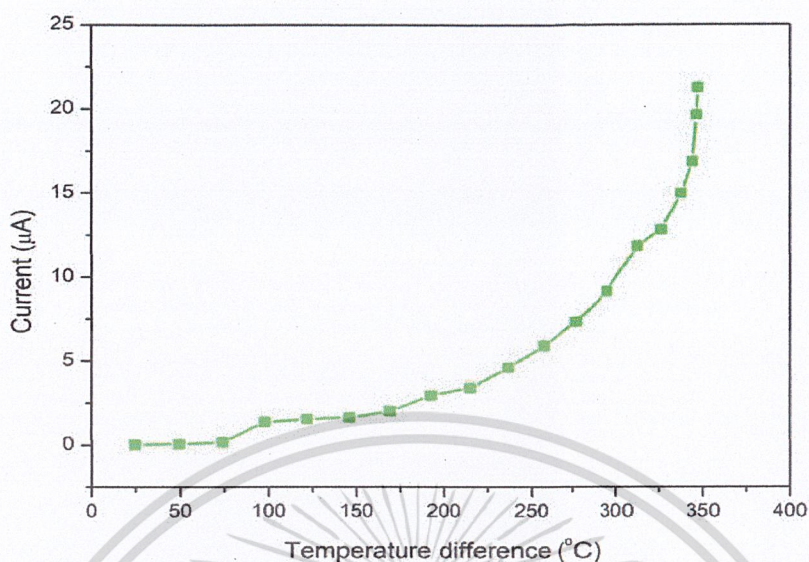
สรุปได้ว่าโมดูลแบบหุ้มฉนวนมีค่าไฟฟ้าดีกว่าโมดูลแบบไม่หุ้มฉนวน เนื่องจากเกิดความต่างของอุณหภูมิมากกว่าจึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงกว่าโมดูลแบบไม่หุ้มฉนวน ซึ่งเป็นไปตามสมการซีเบค

4.5.3 ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si ด้วยระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันที่อุณหภูมิ $750^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.20 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และความต่างศักย์ (V) ของโมดูล Mg_2Si (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และกระแสไฟฟ้า (I) ของโมดูล Mg_2Si

ผลการทดสอบไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si เฝ้าซินเตอร์ในระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันที่อุณหภูมิ $650^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบหุ้มฉนวน กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ (V) และความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับกระแสไฟฟ้า (I) พบว่าเมื่อความต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังแสดงจากกราฟความสัมพันธ์ทั้งหมด สรุปได้ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโมดูล Mg_2Si เฝ้าซินเตอร์ในระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันที่อุณหภูมิ $750^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนมีค่ามากกว่า และมีแนวโน้มเป็นไปได้สูงกว่าค่าไฟฟ้าของโมดูล Mg_2Si เฝ้าซินเตอร์ในระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 650 และ $750^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) การสังเคราะห์เพื่อทำให้เกิดเฟสของ Mg_2Si จากสารตั้งต้น Mg และ Si บริสุทธิ์นั้นไม่สามารถเตรียมได้ในบรรยากาศปกติ โดยในงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการเตรียมในระบบเตาเผาชนิดควอตซ์สุญญากาศร่วมกับบรรยากาศอาร์กอน เริ่มแรกทำการหาเงื่อนไขเวลาที่เหมาะสมในการทำให้เกิดเฟส Mg_2Si โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงจากอุณหภูมิที่มีในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และหาเงื่อนไขอุณหภูมิที่เหมาะสม ผลที่ได้คือที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที เกิดเฟสของ Mg_2Si จากการยืนยันด้วยเทคนิค XRD และ EDX ทั้งนี้ยังได้นำ Mg_2Si ที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

2) การสังเคราะห์เพื่อขึ้นรูปของวัสดุโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้การเตรียมในระบบเตาเผาแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650 750 และ $800^{\circ}C$ พบว่าที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ พบว่ายังมีการคงรูปของผลึกและสามารถขึ้นรูปเป็นแท่งโมดูลได้ ดังนั้นจึงนำโมดูลที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ ไปต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อนำไปวัดไฟฟ้าเบื้องต้นได้ และวิธีการเตรียมในระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ พบว่ายังคงรูปของผลึกแล้วนำไปต่อขั้วไฟฟ้าและนำไปวัดไฟฟ้าเบื้องต้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฟฟ้าระหว่างทั้งสองระบบที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปของวัสดุโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$

3) ผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของทั้งสองระบบที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปของวัสดุโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก Mg_2Si พบว่าวิธีการเตรียมในระบบเตาเผาแบบให้ความร้อนพร้อมแรงดันในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ แท่งโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวนมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเตรียมในระบบเตาเผาแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ แท่งโมดูล Mg_2Si แบบหุ้มฉนวน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

1) การสังเคราะห์ Mg_2Si ให้เกิดเฟสจะต้องทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ปราศจาก O_2 เช่นในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ตัวอย่างเช่น แก๊สอาร์กอน เป็นต้น เพราะเมื่อแมกนีเซียม (Mg) ทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน จะทำให้เกิดเปลวไฟสว่างและเกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะขึ้น เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการฟีดแก๊สเพื่อกำจัด O_2 ออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เนื่องจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารแมกนีเซียมซิลไซด์ทำงานอยู่ในย่านอุณหภูมิปานกลาง ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-600 °C เมื่อมีการพัฒนาเป็นวัสดุโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแล้วสามารถที่จะนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผันความร้อนให้เป็นไฟฟ้าโดยตรงได้ จากแหล่งพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์. 2562. เทอร์โมอิเล็กทริก. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] ทศวรรณ สีตะวัน. 2556. เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก. พิมพ์ครั้งที่ 2. สกลนคร : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
- [3] <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/aqr/thermoelectric>
- [5] เบญจพร พวงจำปี. 2547. ซิลิกอน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
- [6] Kingaley Kweku Larbi. 2010. "Synthesis of high Purity Silicon from Rice Husks"
A thesis submit in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Graduate Department of Materials Science and Engineering
University of Toronto
- [7] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
- [8] <http://il.mahidol.ac.th>
- [9] ร.ศ.แมน อมรสิทธิ์. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูล JCPDS Magnesium silicide (Mg₂Si)

00-035-0773

Mar 4, 2019 2:19 PM (User)

PDF Card Report

Status: Primary QM: Star (S) Pressure/Temperature: Ambient
Chemical Formula: Mg₂Si Empirical Formula: Mg₂Si Weight %: Mg63.38 Si36.62
Atomic %: Mg66.67 Si33.33 Compound Name: Magnesium Silicon

Experimental

Author's Reported Data

Radiation: CuKα1 : 1.5406Å Filter: Graph Mono d-Spacing: Diff.
Cutoff: 17.70 Intensity: Diffractometer

Physical

SYS: Cubic SPGR: Fm-3m (225)
Author's Cell
AuthCell a: 6.35119(16)Å AuthCell Vol: 256.19Å³ AuthCell Z: 4.00
AuthCell MolVol: 64.05
Dcalc: 1.988g/cm³ SS/FOM: F(19) = 141.8(0.0071, 19)

Crystal

ICDD Calculated Parameters

Space Group: Fm-3m (225) Molecular Weight: 76.70

Crystal Data

XtlCell a: 6.351Å	XtlCell b: 6.351Å	XtlCell c: 6.351Å
XtlCell : 90.00°	XtlCell : 90.00°	XtlCell : 90.00°
XtlCell Vol: 256.19Å ³	XtlCell Z: 4.00	

Crystal Data Axial Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reduced Cell

RedCell a: 4.491Å

RedCell b: 4.491Å

RedCell c: 4.491Å

RedCell : 60.00°

RedCell : 60.00°

RedCell : 60.00°

RedCell Vol: 64.05Å³**Structure****Crystal (Symmetry Allowed):** Centrosymmetric**Miscellaneous****CAS:** 22831-39-6 **Pearson:** cF12.00 **Prototype Structure:** Ca F2**Prototype Structure (Alpha Order):** Ca F2 **LPF Prototype Structure:** Ca F2,cF12,225**LPF Prototype Structure (Alpha Order):** Ca F2**Subfile(s):** Metals & Alloys, NBS Pattern, Primary Pattern, Inorganic, Common Phase**Entry Date:** 07/01/1984 **Last Modification Date:** 01/15/2012**Cross-Ref PDF #'s:** 00-001-1192 (Alternate), 00-034-0458 (Alternate), 04-001-3251, 04-001-9399, 04-002-0150, 04-003-3755, 04-004-6007, 04-004-6119, 04-004-6327, 04-004-7570**References**

<u>Type</u>	<u>Reference</u>
Primary Reference	Natl. Bur.Stand. (U.S.) Monogr. 25 21, 86 (1985).
Polymorphism	Cannon, P., Conlin, C.Science 145, 487 (1964).
Structure	Klemm, W., Westlinning, H.Z.Anorg. Allg. Chem. 245, 365 (1940).

Comments**Database Comments:** Additional Patterns: To replace 00-001-1192 and 00-034-0458.

Analysis: Spectrographic analysis (wt.%, CERAC, Incorporated): 0.12 Fe; 0.05 Al; 0.01 Mn; 0.001 Ag, Ca, Cr, Cu, Ti. Color: Dark blue. Sample Source or Locality: The sample was obtained from CERAC, Incorporated, Milwaukee, Wisconsin, USA. It contained a small amount of MgO. Temperature of Data Collection: The mean temperature of data collection was 296.7 K. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

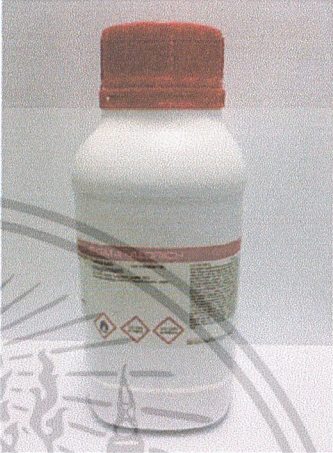
d-Spacings (19) - 00-035-0773 (Fixed Slit Intensity) - Cu K1 1.54056Å

2	d(A°)	l	h	k	l
24.2414	3.668490	41	1	1	1
28.0723	3.176190	12	2	0	0
40.1209	2.245640	100	2	2	0
47.4328	1.915120	15	3	1	1
49.6758	1.833770	2	2	2	2
58.0284	1.588120	13	4	0	0
63.8335	1.456970	6	3	3	1
65.6981	1.420060	3	4	2	0
72.9009	1.296490	21	4	2	2
78.1175	1.222440	4	5	1	1
86.6331	1.122810	4	4	4	0
91.6948	1.073580	2	5	3	1
93.3767	1.058610	<1	6	0	0
100.1782	1.004220	3	6	2	0
105.3672	0.968540	1	5	3	3
107.1122	0.957537	<1	6	2	2
114.3406	0.916688	1	4	4	4
120.0281	0.889317	1	5	5	1
122.0098	0.880661	<1	6	4	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินวิจัย

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.1	ผงแมกนีเซียม : Mg (20-30 mesh, reagent grade, 98%) Lot #MKBK6309V ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา	
ข.2	ผงซิลิกอน : Si (-325 mesh, 99% trace) Lot#SHBJ8118 ผลิตโดยบริษัท Aldrich chemistry ประเทศสหรัฐอเมริกา	
ข.3	แก๊สอาร์กอน (Ar) ความบริสุทธิ์ 99.99 % บริษัท แพกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด	

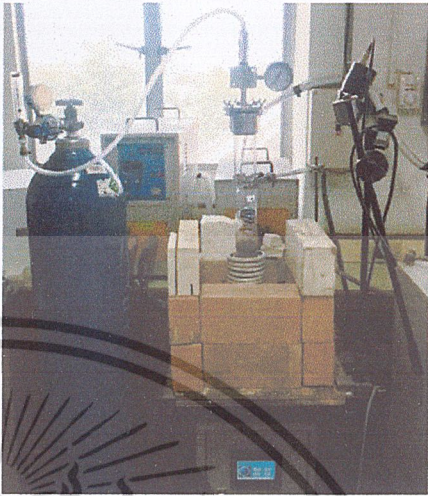
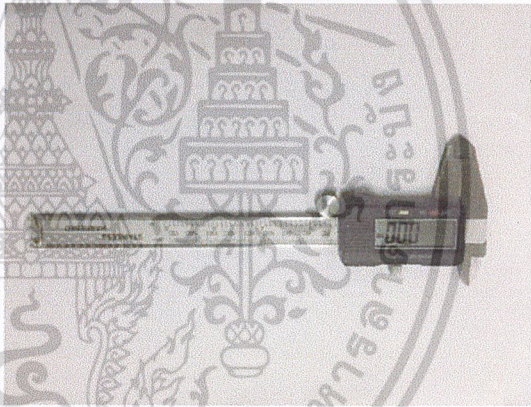
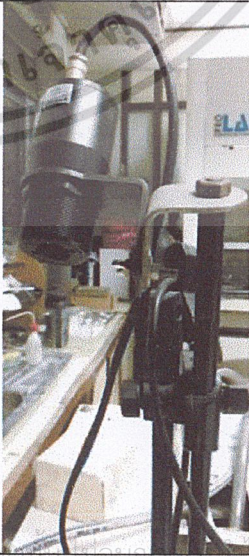
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.4	ถ้วยอะลูมินา	
ข.5	ถ้วยแกรไฟต์	
ข.6	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ U1241 C/U1242C 4-Digital Handheld Digital Multimeter, make in Malaysia, KEYSIGHT Technologies	

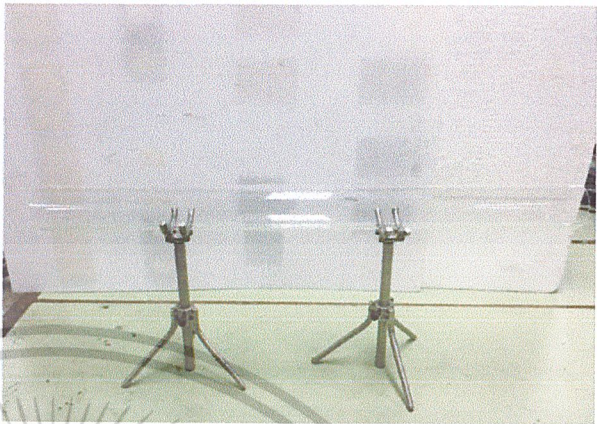
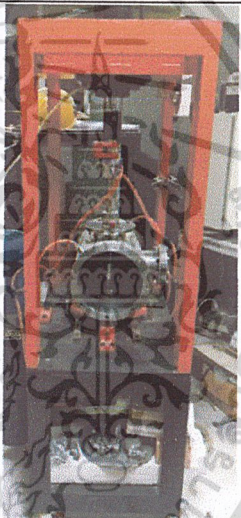
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.7	6105 Resistivity adapter Keithley instrument, inc., Cleveland, Ohio, made in U.S.A	
ข.8	เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared thermometer) รุ่น Banatech GM1651 -30°C ~ 165 °C (-22°F~300 °F)	
ข.9	เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น WANT® Electronic Balance, Capacity : 220 g, Volt : Work with 12 V	

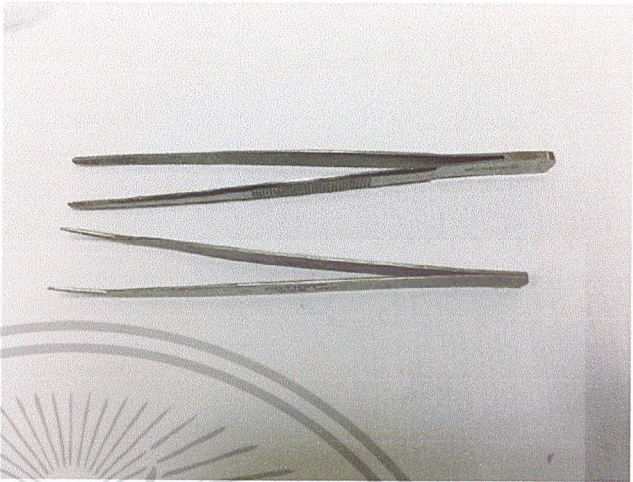
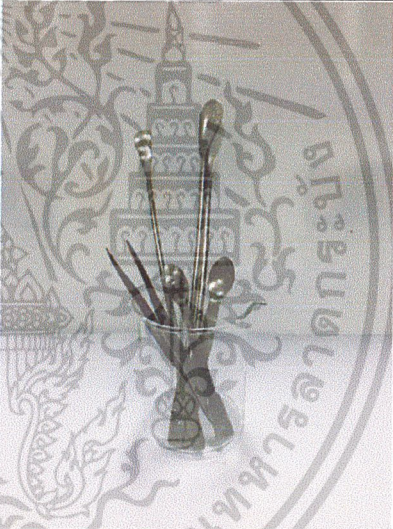
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.10	ระบบเตาเผาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnance) รุ่น M-Series ผลิตโดยบริษัท CEP ประเทศไทย	
ข.11	Vernier caliper รุ่น Starnic 150 x 0.02 mm / 6" x 1 / 1000"	
ข.12	กล้องตรวจจับอินฟราเรด รุ่น E-40 บริษัทเทอร์โมสแกน ประเทศไทย	

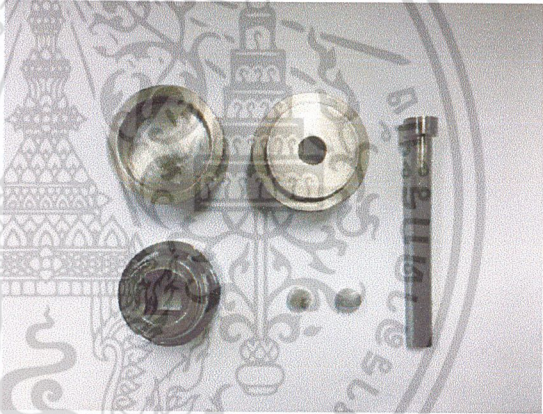
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้คนอื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.13	ท่อควอตซ์ทนอุณหภูมิสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm	
ข.14	เครื่องอัดไฮโดรลิกกึ่งอัตโนมัติขนาดแรงดัน 5000 psi ผลิตโดยบริษัท Risen Gold	
ข.15	เครื่องดูดควัน (Fume hood) ผลิตโดยบริษัท Design-alternative ประเทศไทย, Model : FH150 SE/FRDT	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.16	ฟอร์เซฟสแตนเลน (Forceps)	
ข.17	แท่งคนสาร ช้อนตวง สาร	
ข.18	บีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร, 250 มิลลิลิตร และ 600 มิลลิลิตร	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	วัตถุดิบและสารเคมี	รูปภาพประกอบ
ข.19	ครกหยก สำหรับบดสารเคมี ชนิด agate	
ข.20	บล็อกอัดสารขึ้นรูป ได้แก่ บล็อกอัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง 10.0 ซม. และ บล็อกอัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง 1.5 ซม.	
ข.21	กระดาษชั่งสารเคมี (Weighing Paper) ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ยี่ห้อ Whiteman	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางบันทึกผลการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นของโมดูล Mg_2Si

ตาราง ค.1 บันทึกผลการทดลองการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 นาที ด้วยระบบเตาเผา Induction ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (หุ้มฉนวน)

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R ($M\Omega$)
50	35.1	6.51	0.0019	12.67
75	36.3	11.58	0.0085	9.57
100	37.7	18.99	0.0036	8.44
125	39.8	19.32	0.0086	6.795
150	40.5	20.52	0.0038	6.635
175	43.7	28.42	0.0081	5.971
200	46.9	50.54	0.0031	5.58
225	51.2	62.21	0.0079	4.66
250	56.2	102.74	0.0022	4.36
275	62.9	111.5	0.0069	3.51
300	70	144.11	0.0032	3.14
325	79	147.94	0.005	2.4
350	89.5	147.63	0.009	2.046
375	101.5	177.83	0.0069	1.175
400	117.3	78.46	0.026	0.554
425	135.5	59.68	0.026	0.48

ตาราง ค.2 บันทึกผลการทดลองการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 นาที ด้วยระบบเตาเผา Induction ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (ไม่หุ้มฉนวน)

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R ($M\Omega$)
50	46.2	18.25	0.002	61.62
75	50.1	22.59	0.002	46.52
100	53.4	35.75	0.002	22.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R (M Ω)
125	57.4	39.74	0.005	19.38
150	62.5	43.96	0.006	18.14
175	68.7	46.42	0.005	12.56
200	76.7	141	0.007	11.97
225	86.1	178.08	0.004	6.17
250	97.2	228.88	0.009	5.42
275	108.3	314.44	0.006	4.62
300	122.6	382.25	0.01	4.29
325	140.2	206.12	0.011	3.35
350	157.2	119.52	0.016	3.6
375	177.5	87.16	0.012	2.81
400	202.7	77.22	0.017	1.56
425	230.8	48.3	0.029	0.29

ตาราง ค.3 บันทึกผลการทดลองการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 นาที ด้วยระบบเตาเผา Induction ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (หุ้มฉนวน)

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R (k Ω)
50	27.9	6.31	0.003	1,586
75	29.2	8.77	0.021	1,090
100	32.1	15.89	0.039	351
125	35.3	22.01	0.098	303
150	40.5	34.96	0.117	156
175	45.1	32.29	0.221	125
200	50.8	39.06	0.323	83
225	58.6	41.45	0.696	61.22
250	64.7	43.9	0.877	42.77
275	75.8	44.93	1.504	35.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปิดเผยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R ($k\Omega$)
300	86.7	47.17	1.811	26.8
325	99.4	49.21	2.627	21.7
350	109.7	49.76	2.689	21.88
375	123.6	51.36	3.766	19.26
400	142.4	53.93	4.935	15.54
425	162.1	53.43	6.898	13.26

ตาราง ค.4 บันทึกผลการทดลองการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 นาที ด้วยระบบเตาเผา Induction ร่วมกับท่อควอตซ์สุญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (ไม่หุ้มฉนวน)

T_H	T_C	V (mV)	I (μA)	R ($k\Omega$)
50	35.1	16.94	0.011	3,572
75	40.2	22.22	0.01	2,391
100	44.6	22.86	0.015	1,274
125	50.4	23.07	0.021	421
150	56.1	23.64	0.037	277
175	62.7	24.69	0.089	221
200	68.5	27.2	0.099	164
225	77.3	27.93	0.169	133
250	87.8	28.7	0.231	99
275	96.7	29.96	0.356	86
300	106.7	29.87	0.434	63.76
325	120.5	34.82	0.542	55.78
350	136.1	37.69	0.681	42.43
375	156.3	38.14	1.109	32.6
400	176.9	40.76	1.409	25.29
425	204.7	35.25	1.997	21.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

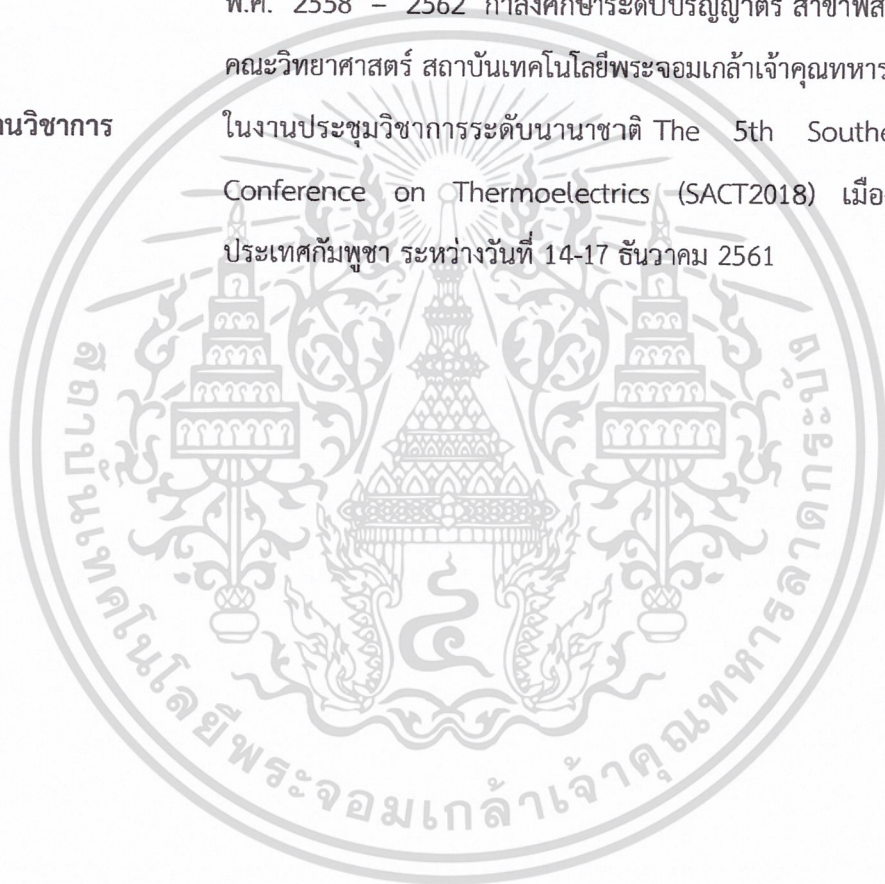
ตาราง ค.5 บันทึกผลการทดลองการวัดไฟฟ้าเบื้องต้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 นาที ด้วยระบบเตาเผา Hot pressing ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (หุ้มฉนวน)

T _H	T _C	V (mV)	I (μA)
50	25.6	1.1	0.02
75	25.7	3.3	0.06
100	26.3	6.4	0.15
125	27.1	9.6	1.37
150	28.2	15.3	1.53
175	29.1	18	1.64
200	30.7	22	2.01
225	32.3	24.2	2.95
250	35.1	33.1	3.4
275	38.4	48.1	4.61
300	42.9	49.4	5.9
325	48.4	55.8	7.32
350	55.5	62.3	9.14
375	63.2	67.3	11.82
400	73.8	72.9	12.82
425	88	78.5	14.96
450	106.1	83	16.86
475	128.6	86.1	19.63
500	152.9	86.4	21.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุนิศา คำมะโฮง
วัน/เดือน/ปีเกิด	3 กุมภาพันธ์ 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	29 หมู่ 12 ตำบลบัวใหญ่ อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น 40140
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546 – 2552 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านคำมวดงเย็น พ.ศ. 2552 – 2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนน้ำพองศึกษา พ.ศ. 2558 – 2562 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิชาการ	ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 5th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics (SACT2018) เมืองเสียมเรียบ ประเทศกัมพูชา ระหว่างวันที่ 14-17 ธันวาคม 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้