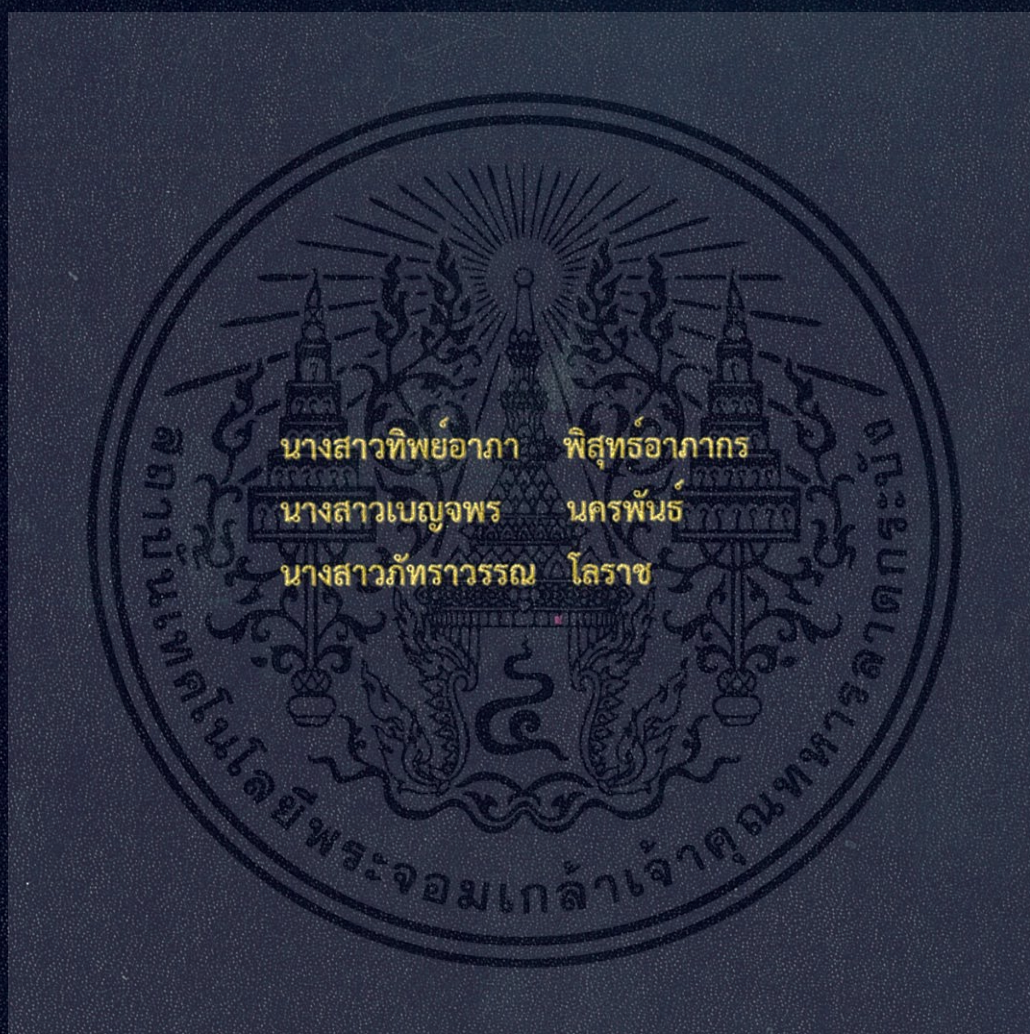


การสังเคราะห์และศึกษาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
เจือด้วย Fe_2O_3 และ SiO_2

SYNTHESIS AND STUDYING THERMOELECTRIC MATERIAL OF
 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ COMPOUNDS DOPED WITH Fe_2O_3 AND SiO_2



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การสังเคราะห์และศึกษาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
เจือด้วย Fe_2O_3 และ SiO_2

SYNTHESIS AND STUDYING THERMOELECTRIC MATERIAL OF
 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ COMPOUNDS DOPED WITH Fe_2O_3 AND SiO_2



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND STUDYING THERMOELECTRIC MATERIAL OF
 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ COMPOUNDS DOPED WITH Fe_2O_3 AND SiO_2



MISS THIPARPHA
MISS BENJAPORN
MISS PATTRAWAN

PHISUTARPHAKORN
NAKORNPUN
LORAJ

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	SYNTHESIS AND STUDYING THERMOELECTRIC MATERIAL OF $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ COMPOUNDS DOPED WITH Fe_2O_3 AND SiO_2		
Students	MISSTHIPARPHA	PHISUTARPHAKORN	54050530
	MISSBENJAPORN	NAKORNPUN	54050549
	MISSPATRAWAN	LORAJ	54050570
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics		
Department	Physics		
Academic Year	2557		
Advisor	Dr. Chesta Ruttanapun		

Abstract

This research was conducted to prepare mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), mayenite doped with Fe_2O_3 ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$) and mayenite doped with SiO_2 ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$) by solid state reaction methods. Fe_2O_3 doping contents of $x=0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ and 5.00 and SiO_2 doping contents of $x=1.00, 3.00$ and 5.00 . The samples were analyzed in phase and crystal structure properties by X-ray diffraction technique (XRD). The microstructure were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Kind and quantity of elements were analyzed by energy dispersive X-ray analysis (EDX). The XRD analysis results confirm that the structure is cubic structure by comparing with standard peak of $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ from JCPDS file No. 48-1882. From EDX results, it confirm that Fe_2O_3 and SiO_2 atom exist. Image SEM, the most particle size of Fe_2O_3 doped mayenite is $1.76 \mu\text{m}$ at $x=1.00$ and the most particle size of SiO_2 doped mayenite is $1.58 \mu\text{m}$ at $x=1.00$. The most of thermal conductivity Fe_2O_3 doping of $x=1.00$ is $0.66-0.77 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ at 300K and the most of thermal conductivity SiO_2 doping of $x=5.00$ is $0.96-1.04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ at 50K

Keywords : $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, Thermoelectric oxide

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	2
3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	17
3.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	18
3.3 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	19
4.1 แสดงรัศมีไอออนิกของอะตอมชนิดต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	32
4.2 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และขนาดผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง	33
4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอะตอม Ca, Al, Fe และ O สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00$)	36
4.4 แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	37
4.5 แสดงรัศมีไอออนิกของอะตอมชนิดต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	40
4.6 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และขนาดผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	41
4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอะตอม Ca, Al, Si และ O สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	43
4.8 แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Thomas Johann Seebeck	4
2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า	4
2.3 Jean Charles Athanase Peltier	5
2.4 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์	6
2.5 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	7
2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี	7
2.7 (a) พันธะของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (b) unit cell ของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ที่มี 12 พันธะ	9
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	17
3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	18
3.3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	19
3.4 ชั่งสารเคมีตามที่คำนวณไว้	20
3.5 การผสมสาร	20
3.6 การบดมิลล์	21
3.7 การกรองสาร	21
3.8 การอบสาร	22
3.9 (a.) ผงสารที่เจือด้วย Fe_2O_3 (b.) ผงสารที่เจือด้วย SiO_2	22
3.10 วิธีการอัดขึ้นรูป	23
3.11 เม็ดสารที่เผาแล้ว	24
3.12 หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	26
3.13 หลักการทำงานของเครื่อง SEM	27
3.14 หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์	28
3.15 ไดอะแกรมวัสดุสภาพนำความร้อน	29
4.1 กราฟการสลายตัวทางความร้อน (TGA/DTG) ของผงผลึก $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	30
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติที่สถานะ ของแข็งที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	31
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติที่สถานะ ของแข็งที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	32
4.4 สเปกตรัมอัตราส่วนของอะตอมจาก EDX ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	36
4.5 ภาพถ่าย SEM	37
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติที่สถานะ ของแข็งที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	39
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติที่สถานะ ของแข็งที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	40
4.8 สเปกตรัมอัตราส่วนของอะตอมจาก EDX ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	42
4.9 ภาพถ่าย SEM	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง K (W/mK) กับ T (K) ของสารประกอบ $Ca_{12}Al_{14-x}Fe_xO_{33}$	46
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง K (W/mK) กับ T (K) ของสารประกอบ $Ca_{12}Al_{14-x}Si_xO_{33+x/2}$	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันโลกของเราประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งมีสาเหตุมากจากการที่มนุษย์เผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติเพื่อผลิตพลังงาน โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกออกสู่บรรยากาศ และความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทน และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานใหม่ที่กลุ่มผู้วิจัยสนใจคือ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้เป็นวัสดุตัวในการผลิตอุปกรณ์ผันกลับความร้อนที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมให้กลับมาเป็นกระแสไฟฟ้าได้ โดยไม่มีมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม หากให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกยังสามารถผันกลับให้เกิดความร้อนหรือความเย็นได้ด้วย จึงนับได้ว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอีกแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ ที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาของงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยได้สนใจในการสังเคราะห์สาร $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการทำเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล ซึ่งสารประกอบที่ผู้ทำวิจัยได้นำมาสังเคราะห์นี้เตรียมง่าย มีราคาถูก ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ที่วัดได้
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบทั้งสามชนิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$
2. ตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง XRD และ ZEM
3. ตรวจสอบสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (สภาพนำความร้อน)
4. ตรวจสอบวัดสัดส่วนของผลึกด้วยเครื่อง EDX
5. ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารทั้งสามชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
2. ศึกษาสารประกอบที่ใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
3. สังเคราะห์สารประกอบ
4. ตรวจสอบสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก
5. ศึกษาผลการทดลองและวิเคราะห์
6. ทำ Presentation เตรียมนำเสนอและรูปเล่ม

ตารางที่ 1.1 ตารางขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

ขั้นตอน	ระยะเวลา							
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1								
ขั้นตอนที่ 2								
ขั้นตอนที่ 3								
ขั้นตอนที่ 4								
ขั้นตอนที่ 5								
ขั้นตอนที่ 6								

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สังเกตและศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยอื่นๆ ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเมไนด์ (mayenite) กระบวนการสังเคราะห์สาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารที่ทำการสังเคราะห์ โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 นิยามของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [1]

เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) มาจากคำ 2 คำคือ ความร้อน (Thermal) และ ไฟฟ้า (Electrical) ดังนั้นจึงเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนเป็นไฟฟ้า กล่าวคือ ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการผันความร้อนให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) ซึ่งก็คือ สมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความร้อน เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้านที่อุณหภูมิสูงพาหะนำไฟฟ้าจะถ่ายเทไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้พาหะนำไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งจะได้กระแสไฟฟ้าออกมา ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกถูกจ่ายด้วยกระแสไฟฟ้า ทำให้พาหะไฟฟ้าเคลื่อนที่พร้อมกับดูดกลืนพลังงานความร้อนจากภายนอกไปทั้งอีกด้านหนึ่งของวัสดุ ส่งผลให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิ กล่าวคือด้านร้อนและด้านเย็น

2.2 หลักการของเทอร์โมอิเล็กทริก

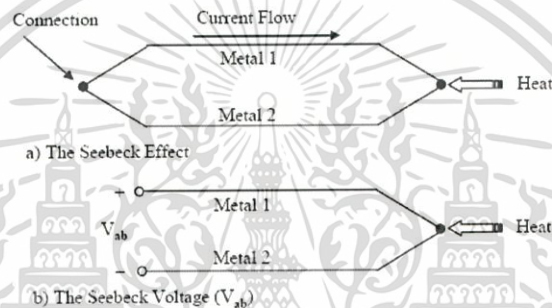
หลักการที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอิเล็กทริก จะเป็นหลักการเกี่ยวกับความร้อนและไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน ซึ่งมีปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 แบบ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck) ,ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier)

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)

ในปี ค.ศ.1821 ค้นพบโดย Thomas Johnson Seebeck เป็นปรากฏการณ์พื้นฐานสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power generator device) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันค้นพบว่า “เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำ (Conductor) สองชนิด จะเกิดแรงดันและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อเป็นวงจรปิด ” ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) [14]



รูปที่ 2.1 Thomas Johann Seebeck [15]



รูปที่ 2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า [16]

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้าความสำคัญทางกายภาพของมัน สามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุแต่ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิหนึ่งพาหะอิสระต่าง ๆ ที่ปลายด้านร้อน (Hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force หรือ back e.m.f) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลที่เกิดขึ้นเรียกว่าความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck voltage) สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะได้ว่า

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

โดยที่ V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า, (V)

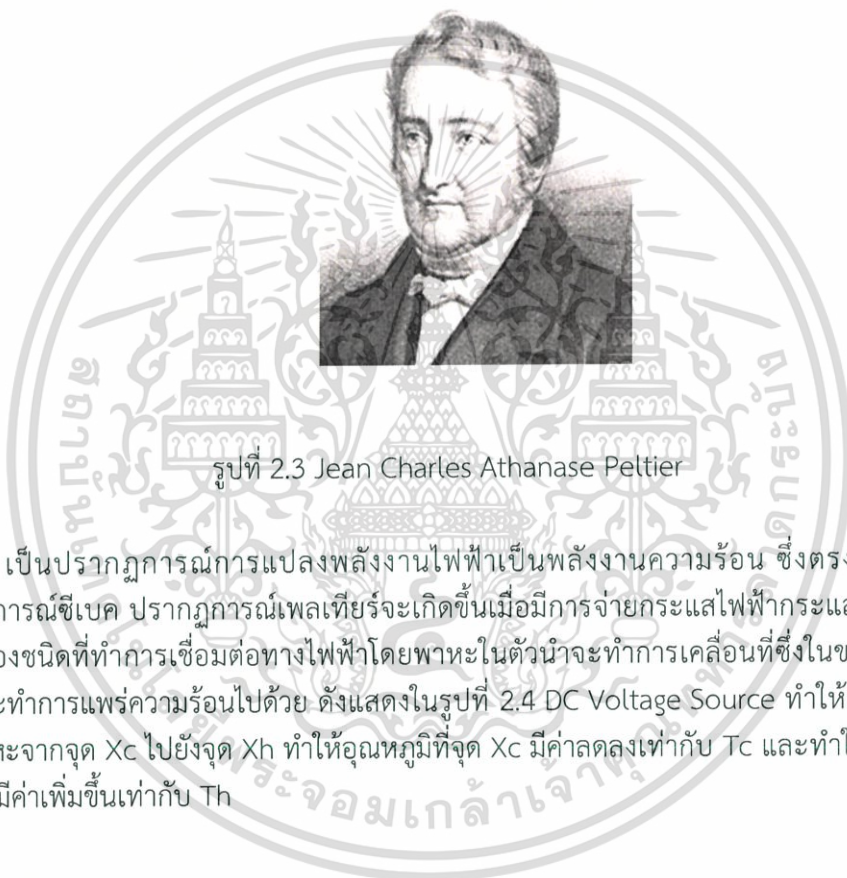
T = อุณหภูมิ, (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ N-type จะมี seebeck coefficient เป็นลบ แต่ P-type จะมี seebeck coefficient เป็นบวก เป็นต้น

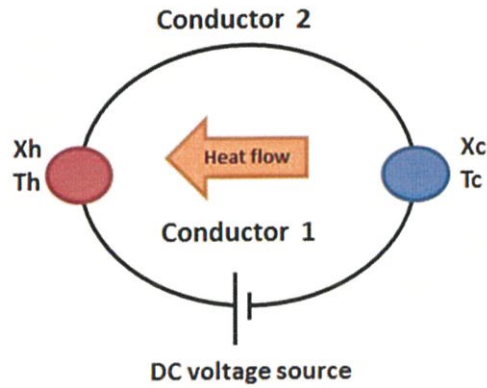
2.2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ในปีค.ศ.1834 ยีน เพลทีเยอร์ชาร์เลส อะธานเนส (Jean Charles Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า” [5]



รูปที่ 2.3 Jean Charles Athanase Peltier

เป็นปรากฏการณ์การแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ซีเบค ปรากฏการณ์เพลเทียร์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวนำสองชนิดที่ทำการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยพหะในตัวนำจะทำการเคลื่อนที่ซึ่งในขณะเดียวกันพหะจะทำการแพร่ความร้อนไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 DC Voltage Source ทำให้เกิดการแพร่ของพหะจากจุด Xc ไปยังจุด Xh ทำให้อุณหภูมิที่จุด Xc มีค่าลดลงเท่ากับ Tc และทำให้อุณหภูมิที่จุด Xh มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ Th



รูปที่ 2.4 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์ [1]

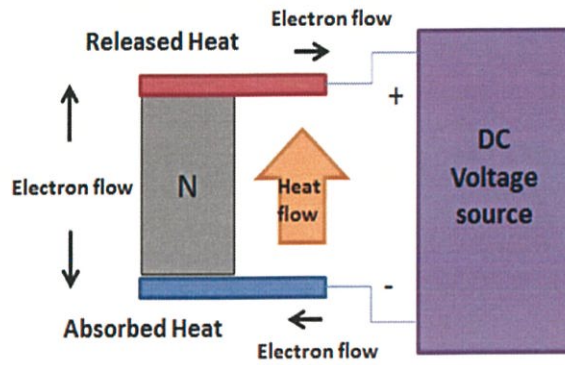
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะสมการ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ดูดซึมทางด้านเย็นกับกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$Q_{absorb} = (\Pi_1 - \Pi_2) I \quad (2.2)$$

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

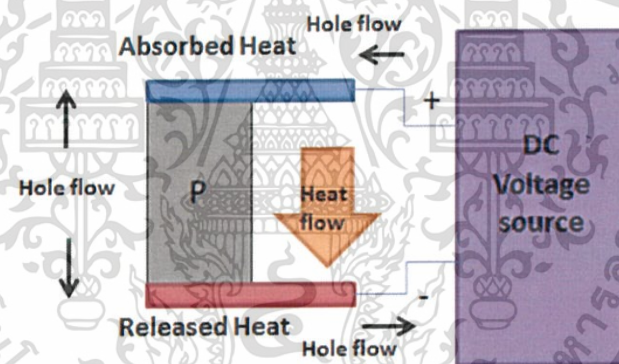
สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นชนิดเอ็นและชนิดพีจะมีทิศทางการเทความร้อนต่างกันดังนี้ [12]

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นลบ จากรูปที่ 2.5 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบซึ่งอยู่ด้านล่างเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ด้านล่าง อิเล็กตรอนบริเวณนั้นมีพลังงานสูงและจะพยายามแพร่ไปด้านบนเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างที่อิเล็กตรอนแพร่ขึ้นไปด้านบนนั้นก็ให้นำเอาความร้อนที่ถูกดูดเข้ามาบริเวณด้านบนร้อนขึ้นไปปล่อยออกบริเวณด้านเย็น



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [12]

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีโฮลเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นบวกจากรูปที่ 2.6 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกซึ่งจะอยู่ข้างบนเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับโฮลที่อยู่ด้านบน โฮลบริเวณนั้นจะมีพลังงานสูงและพยายามเคลื่อนที่ลงด้านล่างเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล พลังงานความร้อนที่ดูดซึมมาจากสิ่งแวดล้อมจะถูกโฮลพาเลงมาปล่อยออกที่ด้านร้อน



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี [12]

2.3 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก [6]

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกบ่งชี้ด้วยค่า “ZT” หรือที่เรียกกันว่า Dimensionless Figure of Merit และจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิวัสดุที่มีค่า ZT ที่สูง หรือมีประสิทธิภาพสูงนั้น จะต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการได้แก่

1. พลังงานความร้อนของวัสดุนั้นต้องถูกขนย้ายด้วยประจุไฟฟ้าให้มากที่สุด คือ ต้องมีค่าซีเบคที่สูง
2. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีแรงต้านทานไฟฟ้าต่ำจึงเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดี มิเช่นนั้นกระแสไฟฟ้าก็จะสูญเสียและเปลี่ยนกลับเป็นความร้อนได้ในเนื้อวัสดุนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นสื่อนำความร้อนที่ไม่ดี เพราะโฟนอนจะเคลื่อนที่หรือขนย้ายความร้อนสวนทางกับทิศทางของประจุไฟฟ้า ดังนั้น ความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องถ่ายเท หรือขนย้ายด้วยประจุไฟฟ้าให้มากที่สุด

อย่างไรก็ดีสมบัติทั้งสามอย่างนี้มักจะมิอยู่ไม่พร้อมกันในวัสดุหนึ่งๆ อย่างเช่น โลหะและสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นทั้งสื่อนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ในขณะที่ฉนวนไฟฟ้าส่วนใหญ่ เช่น ยางหรือพลาสติก เป็นสื่อนำความร้อนที่ไม่ดี

ค่าไดเมนชันเลสฟิกเกอร์ออฟเมอริท (dimensionless figure of merit, ZT) [5] จะคำนวณหาได้จาก

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2.3)$$

หรือฟิกเกอร์ออฟเมอริท (figure of merit)

$$Z = \frac{S^2 \rho}{\kappa} \quad (2.4)$$

โดยที่ ZT คือ ค่า dimensionless figure of merit
 S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)
 ρ คือ สภาพนำไฟฟ้า ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)
 κ คือ สภาพนำความร้อน (W/m K)
 T คือ อุณหภูมิ (K)

หากต้องการวัสดุที่มีค่า ZT สูง วัสดุนั้นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และสภาพนำไฟฟ้า (ρ) สูง และค่าสภาพนำความร้อน (κ) ต่ำ

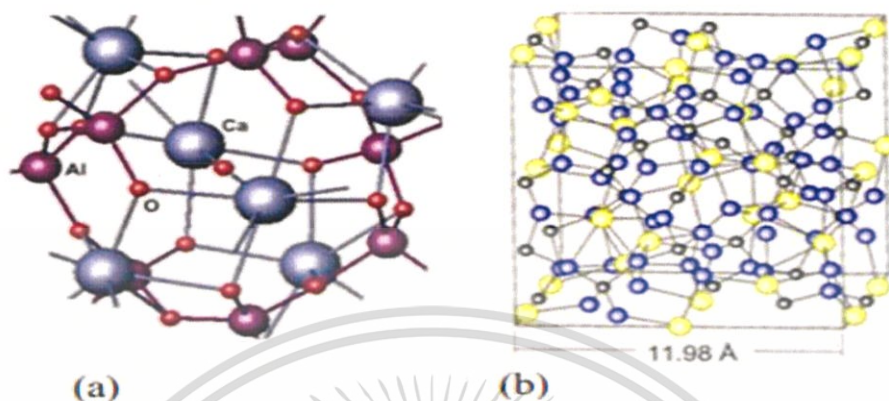
2.4 โครงสร้างโครงผลึกของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ [7]

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (Mayenite) เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจเพราะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่อุณหภูมิ 1390-1400 °C โดย $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมเดิมอยู่แม้ถูกหลอมเหลว (congruently melting compound) สมบัติดังกล่าวนี้จึงสามารถปลูกผลึกเดี่ยวได้โดยตรงจากการหลอมละลาย สมบัติวัสดุที่พบใน $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกที่มีความเจาะจง เช่นอาจจะอธิบายว่าเป็นโครงสร้างแบบ nano-porous cubic โครงสร้างผลึกนี้เป็นแบบ body centered cubic อยู่ใน space group I- 43D (222) โดยมีโครงร่างผลึก $a = 11.989 \text{ \AA}$ และ $Z = 2$ โดยที่สูตร $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ นี้บ่งบอกถึงคุณลักษณะเฉพาะของกระบวนการแพร่ไอออนลบ (Anion)

รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างพันธะของ mayenite ที่มี 12 cage ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ โดย 1 Cage มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 Å และช่องระหว่าง cage ห่าง 3.5 Å และเชื่อว่าช่องว่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมการขนส่งมวลสาร (Mass transport) ระหว่าง cage ภายในและภายนอก โดยที่แลตทิซแสดงความเป็นกลางของประจุเนื่องจากไอออนอิสระของออกซิเจนในแลตทิซ



รูปที่ 2.7 (a) พันธะของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
(b) unit cell ของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ที่มี 12 พันธะ

โดยเฉลี่ยแต่ละ cage มีประจุยังผลเฉลี่ย (mean effective charge) $+1/3$ ดังนั้นประจุลบของออกซิเจนอิสระชดเชยประจุบวกและถูกจับกับไอออนบวก 6 Ca^{2+} สร้างผนัง cage พร้อมกับไอออนบวก Al^{3+} ออกซิเจนไอออนสร้างพันธะแบบหลวมๆ กับโครงร่าง เพราะช่องว่างระหว่างออกซิเจนกับ Ca^{2+} ที่ใกล้ที่สุดประมาณ 1.5 เทา ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าผลรวมรัศมีของอะตอมทั้งสอง ความหนาแน่น cage อยู่ที่ $7.0 - 1021 \text{ cm}^{-3}$ จึงให้ความยืดหยุ่นสำหรับการแทนที่ไอออนอิสระของ O^{2-} กับประจุลบอื่นๆ เช่น ฟลูออไรด์, คลอไรด์, ไฮดรอกไซด์หรือไฮไตรด์ ตลอดจนอิเล็กตรอน

2.5 การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงวิธีการทางเคมีที่ใช้สังเคราะห์ผง ซึ่งในการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีหลายวิธีแต่ในงานวิจัยนี้จะใช้การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid State Reaction)

วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากเตรียมได้ง่าย โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็งตามปริมาณที่ต้องการมาบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่องบด จากนั้นนำไปคั่วให้แห้ง แล้วเผาตามเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ได้สารเนื้อหยาบ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และอาจมีสารประกอบรูปอื่นๆ เจือปนจากสารตั้งต้นหรือจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการบด เช่น ครกบด เป็นต้น สิ่งเจือปนเหล่านี้ที่ผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของสารที่ต้องการเตรียม โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้า

การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่ผงที่สังเคราะห์ได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนโต ทำให้ต้องมีการบดย่อยลดขนาดกันอยู่เสมอ ถ้าการลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดนั้นใช้ลูกบิด ก็อาจทำให้ผงปนเปื้อนมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้

2.6 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก [1]

สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลางเดียวกัน หรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกันโดยอาศัยผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในตัวกลาง การนำความร้อนในของแข็ง เกิดจากการสั่นของโมเลกุลและการถ่ายโอนพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ การวัดสมบัติสภาพนำความร้อน จากการส่งผ่านความร้อนตัวกลาง ถ้าตัวกลางเป็นอากาศ ซึ่งสามารถส่งผ่านความร้อนได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน สำหรับการใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริกในช่วงอุณหภูมิสูง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แลปพลังงาน และ อุณหภูมิที่ให้ค่าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีที่สุด

ในเชิงฟิสิกส์ผลรวมของสภาพนำความร้อน (K) จะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ เทอมแรกจะเป็นของอิเล็กตรอนอิสระและแลตทิซ ดังสมการ

$$K = K_e + K_l \quad (2.5)$$

เมื่อ K_e คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระ
 K_l คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของแลตทิซ

โดยที่ในเทอมของอิเล็กตรอนอิสระ จะถูกอธิบายโดยกฎของไวด์แมนซ์ (Wiedemann-Franz law)

$$K_e = L_0 \sigma T \quad (2.6)$$

เมื่อ L_0 คือ ค่าคงที่ลอเรนซ์ $2.44 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / \text{K}^2$
 σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (S/m)
 T คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์ (K)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

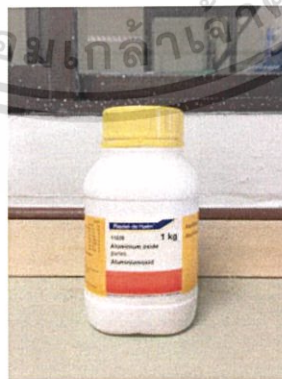
บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยจะอธิบายเกี่ยวกับสารเคมีเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง, อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการเตรียมสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00) และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x= 1.00, 3.00$ และ 5.00) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 98.5% ผลิตโดย Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน



3.1.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 98% ผลิตโดย Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

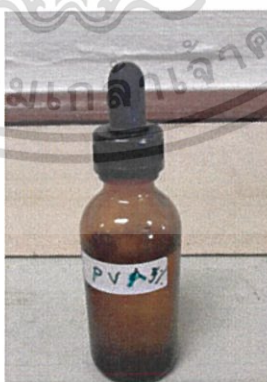
3.1.3 เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดย Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน



3.1.4 ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2)

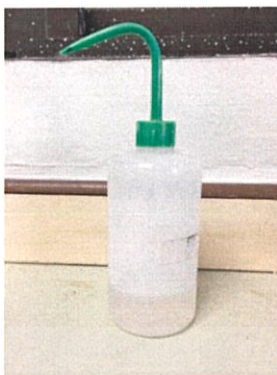


3.1.5 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol : PVA) เข้มข้น 5%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 แอลกอฮอล์



3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.2.2 ซ้อนตักสารและตะแกรงกรอง



3.2.3 ขวดพลาสติกและเม็ดเซอร์โคเนีย

3.2.4 ถ้วยอะลูมินาพร้อมฝาปิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

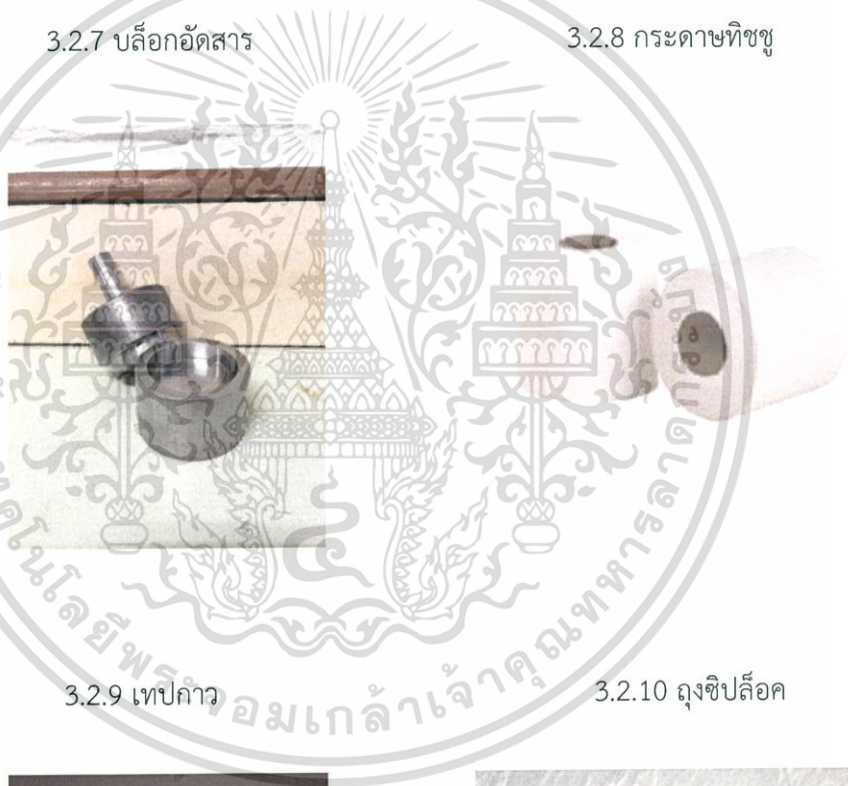
3.2.5 กระดาษฟอยล์



3.2.6 ครกหยก



3.2.7 ปลีอกอัดสาร



3.2.8 กระดาษทิชชู

3.2.9 เทปกาว



3.2.10 ถุงซิปล็อค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม



3.3.2 เครื่องบดละเอียด



3.3.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ตู้อบสาร



3.3.5 เตาเผาไฟฟ้า



3.3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลิตโดยบริษัท OXFORD

3.3.7 เครื่องตรวจสอบสารการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) รุ่น X'Pert 2000 ผลิตโดยบริษัท Philips

3.3.8 เครื่องวัดสภาพนำความร้อน

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมผง $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

เตรียมผง $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ จากสารตั้งต้น CaCO_3 และ Al_2O_3 เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากัน ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการเตรียมสารตัวอย่าง 30 กรัม ปริมาณของสารแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ต้องใช้ (กรัม)
CaCO_3	25.9844
Al_2O_3	15.4411

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเตรียมผง $Ca_{12}Al_{14-x}Fe_xO_{33}$

เตรียมผง $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ จากสารตั้งต้น $CaCO_3$, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากัน ดังสมการ

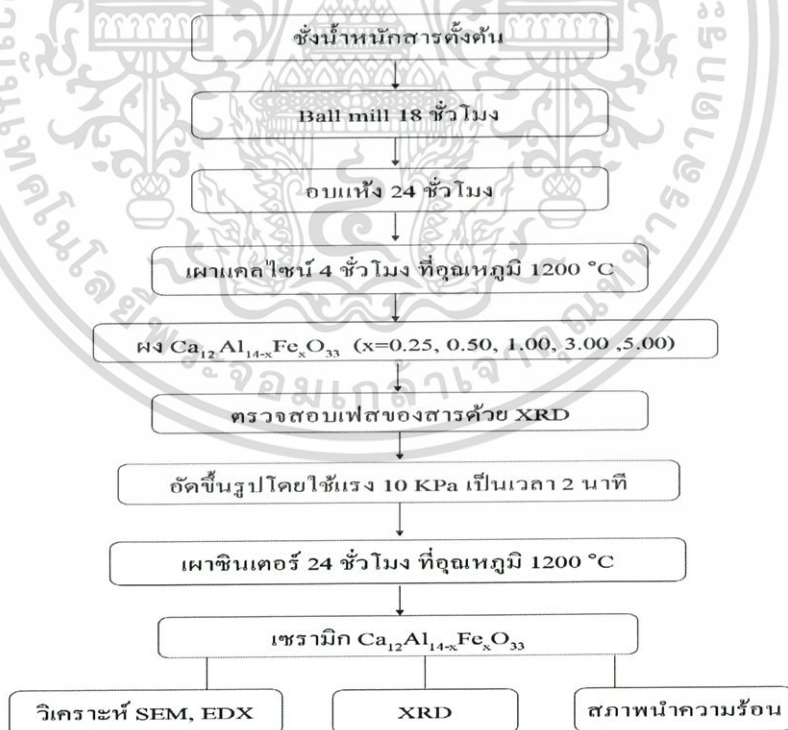


เมื่อ $x=0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00 โดยทำการเตรียมสารตัวอย่าง 30 กรัม ปริมาณของสารแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ $Ca_{12}Al_{14-x}Fe_xO_{33}$

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ต้องใช้ (กรัม)				
	X=0.25	X=0.50	X=1.00	X=3.00	X=5.00
$CaCO_3$	25.8479	25.7169	25.4728	24.4579	23.5348
Al_2O_3	14.8127	14.1909	12.9749	8.3053	3.9959
Fe_2O_3	0.4296	0.8548	1.6922	4.8778	7.8229

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานรูปที่ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $Ca_{12}Al_{14-x}Fe_xO_{33}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมผง $Ca_{12}Al_{14-x}Si_xO_{33+x/2}$

เตรียมผง $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ จากสารตั้งต้น $CaCO_3$, Al_2O_3 และ SiO_2 เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากัน ดังสมการ



เมื่อ $x = 1.00$, 3.00 และ 5.00 โดยทำการเตรียมสารตัวอย่าง 30 กรัม ปริมาณสารที่ต้องใช้แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ $Ca_{12}Al_{14-x}Si_xO_{33+x/2}$

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ต้องใช้ (กรัม)		
	X=1.00	X=3.00	X=5.00
$CaCO_3$	25.8149	25.4825	25.1585
Al_2O_3	13.1489	8.6530	4.2715
SiO_2	1.2914	3.8243	6.2929

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานรูปที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียม $Ca_{12}Al_{14-x}Si_xO_{33+x/2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ชั่งน้ำหนักของผงสารตั้งต้นตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม



รูปที่ 3.4 ชั่งสารเคมีตามที่คำนวณไว้

3.4.5 นำสารเคมีตั้งต้นที่ชั่งแล้ว เทลงในขวดพลาสติกที่ภายในมีเม็ดเซอร์โคเนียและใช้แอลกอฮอล์ฉีดไล่สารที่ติดอยู่กับการระคายพวยลิให้หมด แล้วใส่แอลกอฮอล์เพิ่มจนเกือบเต็มขวด



a.

b.

c.

รูปที่ 3.5

- นำสารที่ชั่งแล้วเทลงในขวดพลาสติก
- ใส่แอลกอฮอล์เพิ่มจนเกือบเต็มขวด
- ขวดที่พร้อมนำไปบดมิลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 ทำการผสมสารด้วยวิธีการหมุน เรียกว่า การบอลมิลล์ ในเครื่องบดละเอียดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 การบอลมิลล์

3.4.7 หลังจากบอลมิลล์เสร็จ นำสารละลายที่ได้มาเทลงในบีกเกอร์โดยใช้ตะแกรงกรองเพื่อทำการแยกเม็ดเซอร์โคเนียออกจากสารตัวอย่าง และทำการฉีดเม็ดเซอร์โคเนียด้วยแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีสารละลายบางส่วนติดอยู่



a.

b.

รูปที่ 3.7

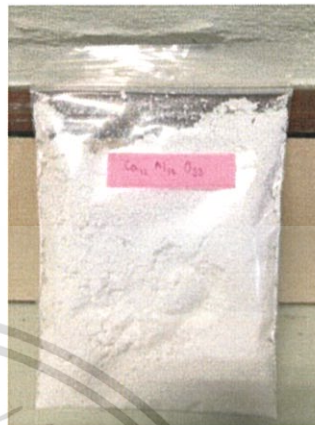
a. กรองสารละลายลงในบีกเกอร์ โดยใช้ตะแกรงกรอง
b. สารละลายที่กรองเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8 นำสารละลายที่กรองแล้วไปอบในตู้อบสารที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยแอลกอฮอล์ออก ซึ่งจะได้สารออกมาเป็นผง



a.

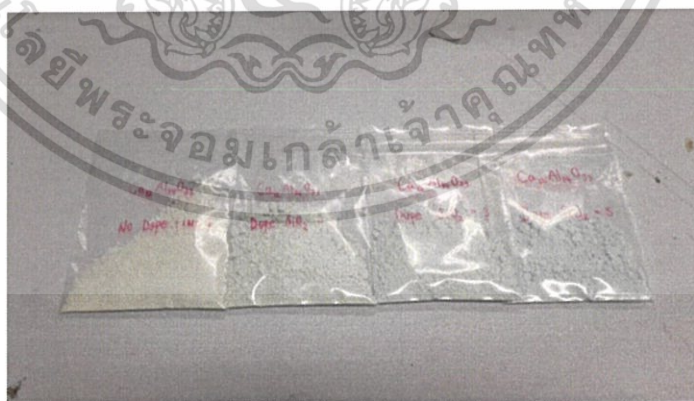


b.

รูปที่ 3.8

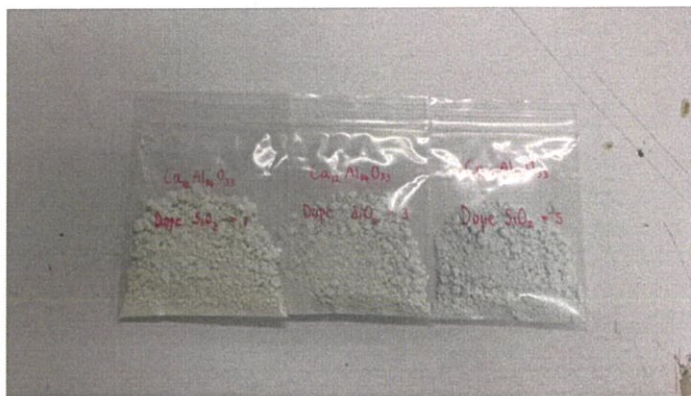
a. นำสารที่กรองแล้วไปอบในตู้อบสาร
b. สารที่ได้เมื่ออบเสร็จ

3.4.9 นำผงสารที่ได้ไปบดให้ละเอียด แล้วใส่ลงในถ้วยอะลูมินา นำไปเผาแคลไซน์ในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำสารที่ได้ไปตรวจสอบเฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



a.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b.

รูปที่ 3.9

a. ผงสารที่เจือด้วย Fe₂O₃b. ผงสารที่เจือด้วย SiO₂

3.4.10 นำผงสารที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมาบดผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA 5%) 1 หยด ในครกบด โดยใช้อัตราส่วนผง 1 กรัมต่อ PVA 1 หยด แล้วนำมาอัดขึ้นรูป โดยนำผงมาใส่บล็อกอัดสารและนำไปอัดในตัวอัดไฮโดรลิกด้วยแรงประมาณ 10KPa เป็นเวลา 2 นาที



a.

b.

รูปที่ 3.10

a. นำสารมาบดผสมกับ PVA 5%

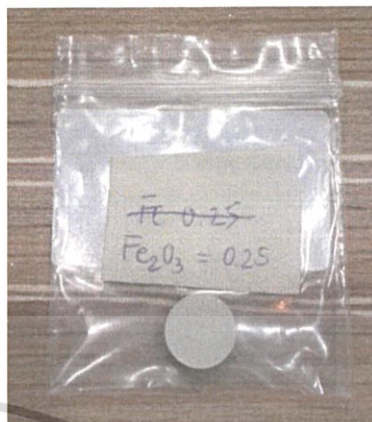
b. อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.11 นำเม็ดสารที่ได้ไปเผา sinter ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



a..



b.



c..



d.



e..



f.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



g..



h.



i.

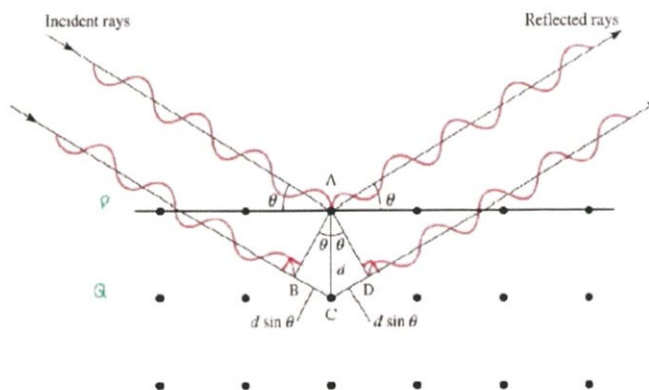
รูปที่ 3.11

- a. เม็ดสารของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
 b.-f. เม็ดสารของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.25, 0.5, 1.0, 3.0$ และ 5.0)
 g.-i. เม็ดสารของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x=1.0, 3.0$ และ 5.0)

3.5 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [4]

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ลงบนผิวของวัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) และเลี้ยวเบนขึ้นซึ่งมีมุมเลี้ยวเบนแตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ จึงสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นสารประเภทใด โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) และความเข้มของพีครังสีเอกซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ถ้ารังสีเลี้ยวเบนจากชุดระนาบเดียวกันเป็นเฟสเดียวกัน (in phase) จะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงดังสมการ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.4)$$

เมื่อ n คือ ลำดับการสะท้อน (1,2,3,...)

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (m)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

θ คือ มุมเลี้ยวเบน

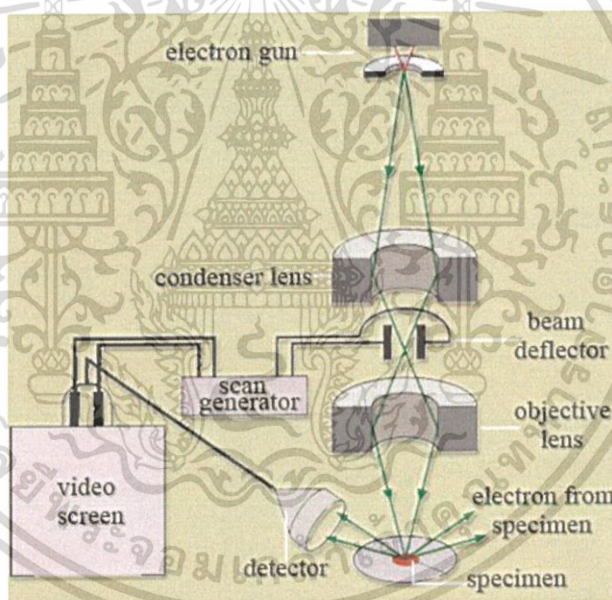
เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปจึงสามารถนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files หรือ ICSD file) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงมุม 10-80 องศา และทำการวัดมุม 0.02 องศาต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

[10]

นำสารที่ได้จากการสังเคราะห์ไปศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะใช้ทั้งแบบผิงและแบบเม็ดในการวิเคราะห์ หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ดังรูปที่ 3.13



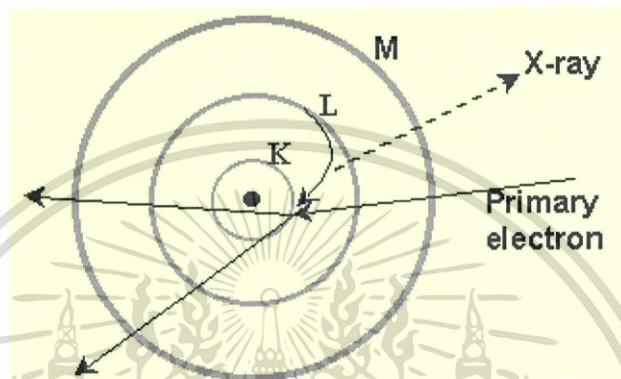
รูปที่ 3.13 หลักการทำงานของเครื่อง SEM

3.7 การตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ [4]

การตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive x-ray analysis; EDX) มีหลักการจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนในชิ้นงาน แล้วปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่ปล่อยออกมานั้นเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุที่ปล่อยออกมา ซึ่งในอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุบวก และอิเล็กตรอนที่มีประจุลบอยู่รอบๆ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างประจุภายในอะตอม แต่ประจุทั้งสองจะต้องสมดุลกันในแต่ละธาตุ การเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสของอะตอมนั้น เป็นที่เข้าใจกันมาเป็นเวลานานแล้วว่าจะเป็นลักษณะของวงอิเล็กตรอน (electron shells) โดยอิเล็กตรอนชั้นในสุดจะมีพลังงานต่ำสุด แต่มีพลังงานพันธะที่แข็งแรงที่สุด และอิเล็กตรอนชั้นนอกนั้นจะมีพลังงานศักย์สูงแต่พลังงานพันธะต่ำและระดับชั้นพลังงานชั้นต่างๆ ของอิเล็กตรอนจะเรียงจากวงในออกไปนอกได้ดังนี้ K, L, M, N, O, P และ Q ตามลำดับ และเนื่องจากความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสทำให้อิเล็กตรอนตั้งต้น (primary electron) ที่มีพลังงานศักย์มากกว่า จึงมักจะไปแทนที่ในระดับพลังงานชั้น K มากกว่าชั้น L

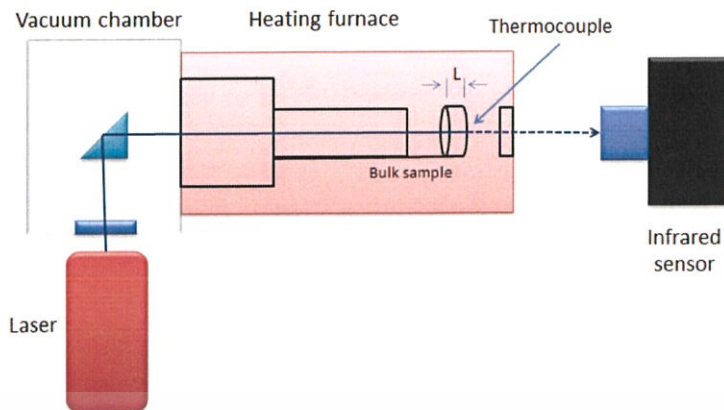


รูปที่ 3.14 หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์

การชนของอิเล็กตรอนตั้งต้น จะเข้าไปชนอิเล็กตรอนภายในวงให้หลุดออกไปจากอะตอม จึงเกิดสถานะที่ถูกกระตุ้น คือ ไม่เสถียร จึงมีความพยายามทำให้เกิดการเสถียร โดยการที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานวงนอกจะเข้าไปแทนที่ โดยกระโดดลงไปแทนที่ช่องว่างที่อิเล็กตรอนวงในหลุดออกไป แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ (X-ray photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงานที่เข้ามาแทนที่กันตามรูปที่ 3.14 และตัวรับสัญญาณ จะรับรังสีเอ็กซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา นับจำนวนและพลังงานที่ปล่อยออกมาแล้วนำเสนอในรูปของกราฟระหว่างระดับพลังงานและจำนวนที่ปลดปล่อยออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของธาตุต่างๆ ก็จะมีพลังงานแตกต่างกันไป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นเราสามารถวิเคราะห์ชั้นงานได้ว่า มีองค์ประกอบของธาตุใดบ้างและมีปริมาณเป็นสัดส่วนเท่าใด

3.8 การวัดสภาพนำความร้อน [12-13]

เป็นการนำเม็ดเซรามิกแบบกลมไปทำการวัดโดยใช้วิธีเลเซอร์แฟลช โดยใช้เครื่อง ULVAC-RIKO, Inc, Yokohama, Japan มีการทำงานดังแสดงในรูปที่ ซึ่งจะวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 50-300 องศาเซลเซียส โดยวิธีเลเซอร์แฟลชเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าการกระจายความร้อน (thermal diffusive, D) ของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมวัดสภาพนำความร้อน

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการกระจายตัวทางความร้อนได้ดังสมการ

$$D = \frac{1.37d^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (3.5)$$

เมื่อ d คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง (g)

$t_{1/2}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิของสารตัวอย่างนี้ไปถึงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ต้องการ (s)

โดยค่าการกระจายความร้อนมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$D = \frac{K}{C_p} \quad (3.6)$$

เมื่อ K คือ สภาพนำความร้อน (W.m⁻¹.k⁻¹)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสาร (J.mol.K)

ซึ่งจากการเครื่องจะใช้โปรแกรมคำนวณค่า K ออกมาซึ่งสัมพันธ์กับสมการข้างต้นในวิธีนี้ เลเซอร์ที่มีพัลส์สั้น (<1 msec) จะถูกยิงเข้าด้านหนึ่งของวัสดุ หัววัดอินฟราเรดจะตรวจอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ด้านตรงข้าม ซึ่งการกระจายความร้อน (thermal diffusivity) สามารถคำนวณได้จากกราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

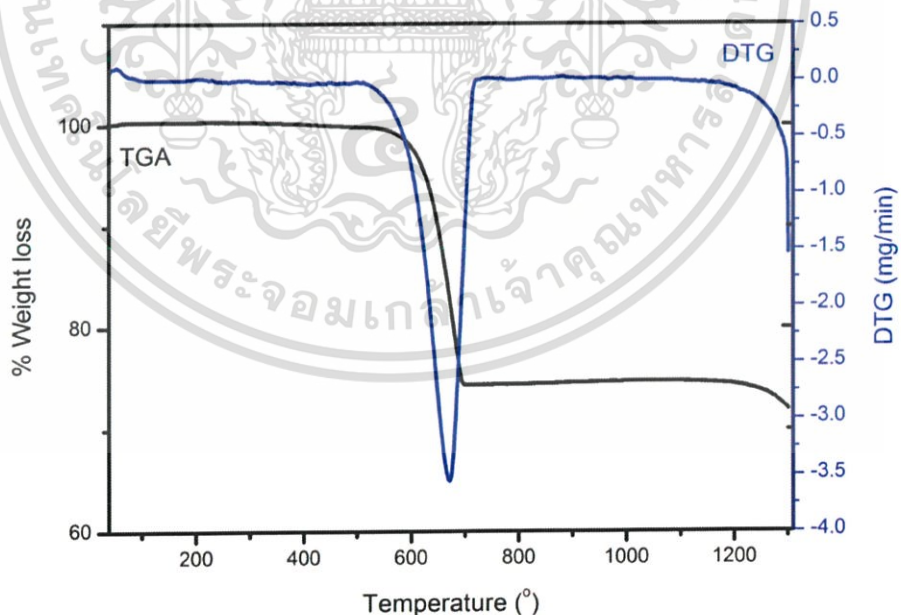
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในส่วนของบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00) และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x=1.00, 3.00$ และ 5.00) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน ตามลำดับ

4.1 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA/DTG)

หลังจากทำการเตรียมสารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จึงนำผงที่ได้ไปตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA เพื่อกำหนดช่วงอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ดังรูปที่ 4.1 แล้วพบว่าการสลายตัวเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 1 ช่วง โดยอยู่ในช่วง 580-650 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ [8] คิดเป็นการสูญเสีย 21.2 % โดยจากกราฟสามารถคาดคะเนช่วงในการเผาแคลไซน์ของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ได้ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซึ่งจากรายงานของ B.J Ingram [9] และคณะพบว่า $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ได้ถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งสามารถขึ้นเฟสได้ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเช่นกัน



รูปที่ 4.1 กราฟการสลายตัวทางความร้อน (TGA/DTG) ของผงผลึก $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ โดยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

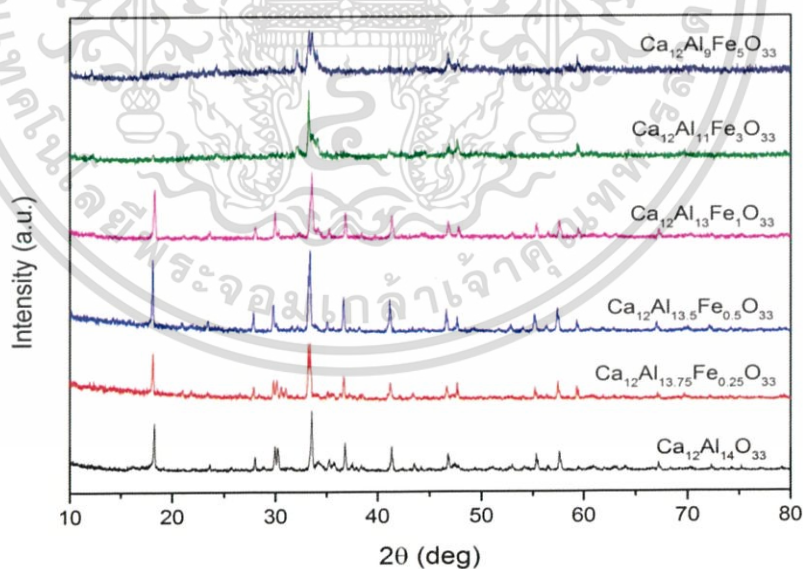
4.2 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึก และสัณฐานวิทยาของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$

4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เมื่อได้ช่วงในการเผาแคลไซน์แล้วจึงทำแคลไซน์สารที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD ซึ่งพบว่าพบว่ามีผลึกที่ผ่านการแคลไซน์อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 18.2, 23.6, 27.9, 29.9, 33.5, 36.8, 41.4, 46.8, 53.0, 55.2, 57.5, 67.1$ และ 72.2 องศาโดยพีคการเลี้ยวเบนทั้งหมดตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

และเมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 ไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{x-1}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ โดยทำการกำหนดอัตราส่วน $x = 0.25, 0.50$ และ 1.00 ตามลำดับ พบว่าเกิดการเลื่อนตำแหน่งของ 2θ ของแต่ละพีคจากพีคมาตรฐาน เนื่องจากขนาดรัศมีไอออนิกของ Fe มีขนาดใหญ่มากกว่า Al ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และสามารถยืนยันการเข้าไปในโครงสร้างคิวบิกด้วยการแสดงค่าคงที่โครงผลึกในตารางที่ 4.2

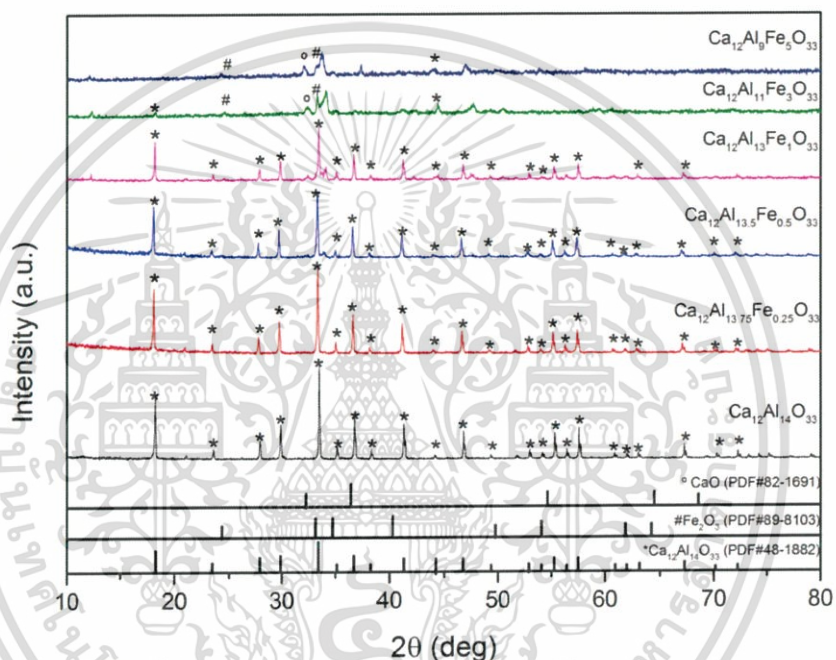
ส่วนเมื่อเจือสาร Fe_2O_3 ที่อัตราส่วน $x = 3.00$ และ 5.00 พบการเลี้ยวเบนของ Fe_2O_3 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 24.57 และ 33.29 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8103 และพบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 32.42 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691 ซึ่งแสดงว่าผลึกที่ได้เมื่อเจือสาร Fe_2O_3 ที่อัตราส่วน $x=3.00$ และ 5.00 จะพบเฟสที่สองในผลึก (secondary phase)



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงรัศมีไอออนิกของอะตอมชนิดต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ [17]

Atomic type	Ionic radius (Å)
Ca	1.00
Al	0.53
Fe	0.55
O	1.40



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการอัดเม็ดและทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ชัดเจนขึ้น จากรูปที่ 4.3 พบว่า เม็ด $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 23.5, 27.9, 29.9, 33.5, 35.2, 36.8, 38.3, 41.3, 44.1, 46.7, 49.3, 52.9, 54.1, 55.3, 56.4, 57.5, 60.8, 61.9, 63.0, 67.2, 70.2 และ 72.2 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนทั้งหมดตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

และเมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 ไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{x-1}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ โดยทำการกำหนดอัตราส่วน $x = 0.25, 0.5$ และ 1.0 ลำดับ พบว่าเม็ดเซรามิกส์ยังคงมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ โดยมีระนาบมุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 23.5, 27.9, 29.9, 33.5,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35.2, 36.8, 38.3, 41.3, 44.1, 46.7, 49.3, 52.9, 54.1, 55.3, 56.4, 57.5, 60.8, 61.9, 63.0, 67.2, 70.2 และ 72.2 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

เมื่อเจือสาร Fe_2O_3 ที่อัตราส่วน $x = 3.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2 และ 44.1 องศา การเลี้ยวเบนของ Fe_2O_3 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 24.57 และ 33.29 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8103 และพบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 32.42 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691

เมื่อเจือสาร Fe_2O_3 ที่อัตราส่วน $x = 5.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏเพียงหนึ่งพีคคือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 44.1 องศา การเลี้ยวเบนของ Fe_2O_3 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 24.57 และ 33.29 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8103 และพบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 32.42 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691 และยิ่งพบอีกว่า เมื่อทำการเจือสารเพิ่มขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงคือ ขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการขยายตัวของผลึก ดังแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และขนาดผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	ค่าคงที่โครงผลึก a (Å)	ขนาดผลึก (nm)
X=0.00 [7]	11.9844	-
X=0.00	11.9854	70.89
X=0.25	11.9993	59.81
X=0.50	12.0003	66.24
X=1.00	12.2417	56.54
X=3.00	11.7669	40.91
X=5.00	12.1609	33.77

จากตารางที่ 4.2 จากการศึกษาโครงสร้าง $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีโครงสร้างแบบคิวบิก โดยการคำนวณแลตทิซพารามิเตอร์ (a) ซึ่งเป็นไปตามสูตรการคำนวณแลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างแบบคิวบิก[3] ดังสมการที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ hkl คือ ระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (h k l) ที่ปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

a คือ แลตทิซพารามิเตอร์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

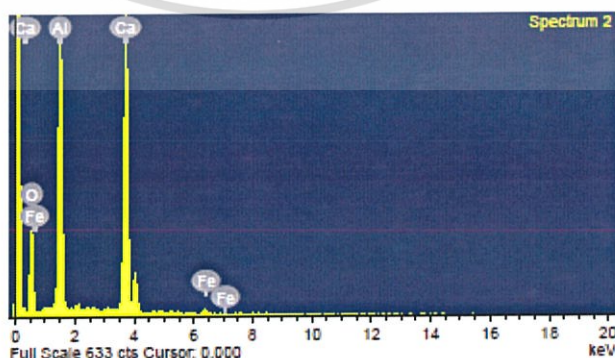
โดยผลจากการคำนวณพบว่า ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ที่ได้จากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับผลของ [7] และเมื่อเจือสารด้วยอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นค่าคงที่โครงสร้างผลึกก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.2.2 การวิเคราะห์ที่สัดส่วนด้วยภาพ EDX

จากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย EDX พบว่า เมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 ที่ $x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เข้าไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ พบว่ายิ่งเจือมากขึ้นจำนวนอะตอมของ Fe_2O_3 ก็ยิ่งมากขึ้นด้วย ดังตารางที่ 4.4

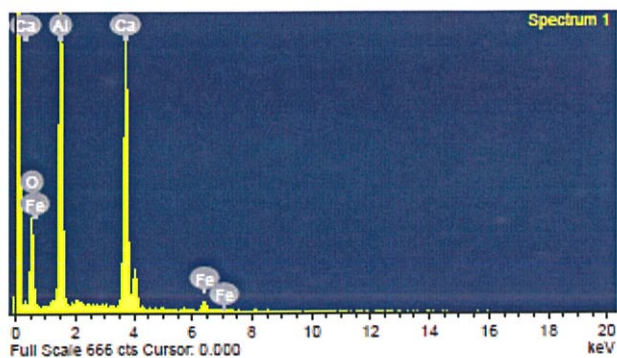


(ก) X=0.00



(ข) X=0.25

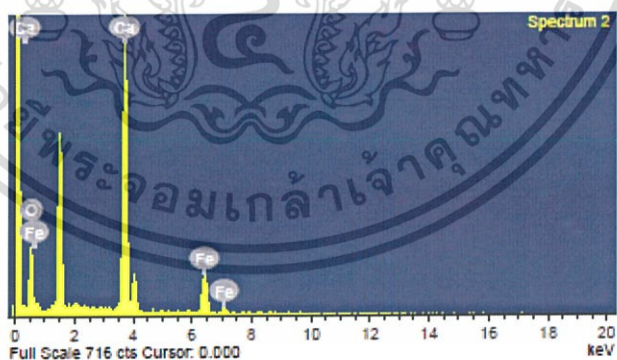
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) X=0.50

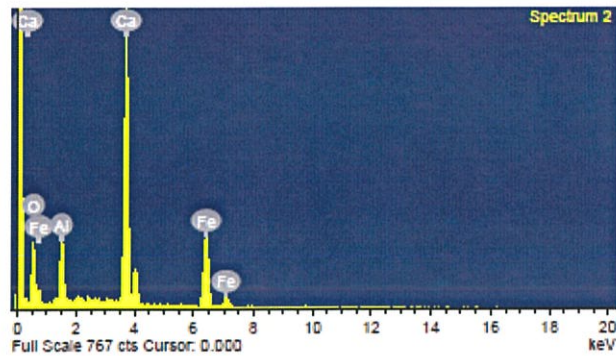


(ง) X=1.00



(จ) X=3.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) X=5.00

รูปที่ 4.4 สเปกตรัมอัตราส่วนของอะตอมจาก EDX ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ (ก) $x=0.00$ (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 1.00 (จ) 3.00 และ (ฉ) 5.00 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.4 ก-ฉ พบว่า ปริมาณอะตอมของ Fe ที่เจือเข้าไปใกล้กับจากทฤษฎีดังแสดงในตาราง ที่ 4.3

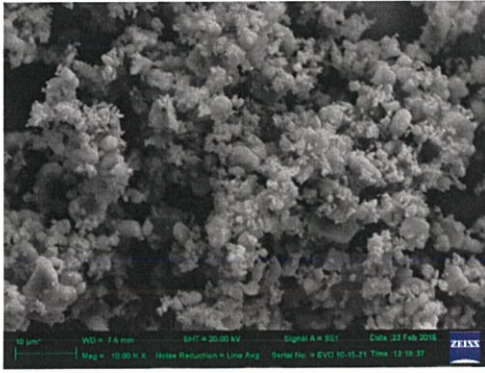
ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอะตอม Ca, Al, Fe และ O สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00$)

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	คำนวณ (Atomic%)				EDX (Atomic%)			
	Ca	Al	Fe	O	Ca	Al	Fe	O
0.00	20.33	23.0	-	55.90	10.13	16.62	-	73.25
0.25	20.33	23.0	0.40	55.90	17.09	16.44	0.47	66.00
0.50	20.33	22.8	0.85	55.90	15.99	16.73	0.86	66.42
1.00	20.33	22.3	1.69	55.90	16.84	15.81	1.43	65.93

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการวิเคราะห์ด้วย SEM จากภาพถ่ายทั้ง ผงและเม็ดพบว่า ยิ่งเจือสารมากขึ้นขนาดผลึกจะมีขนาดเล็กลงและขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

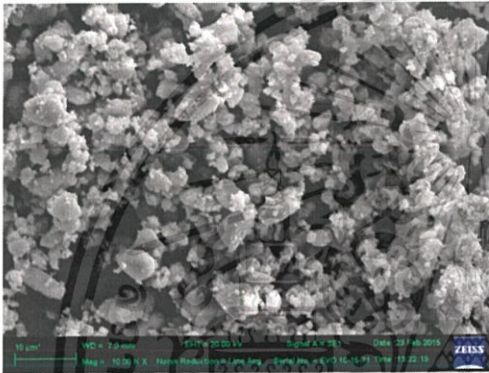
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



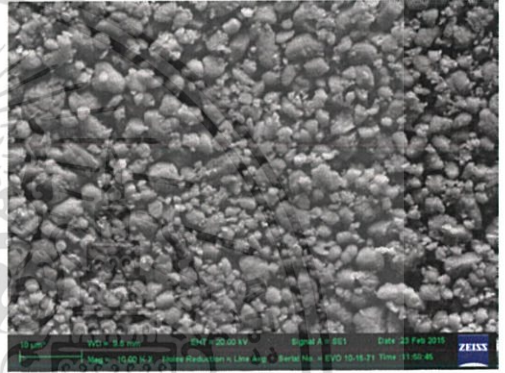
(ก)x=0.00



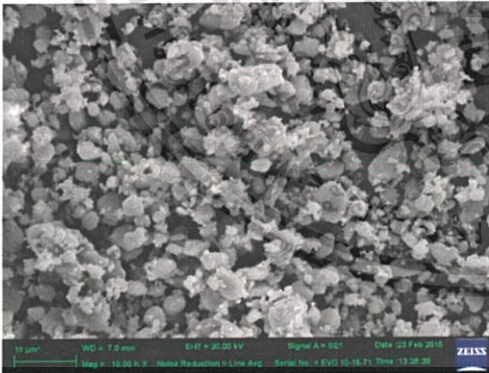
(ข)x=0.00



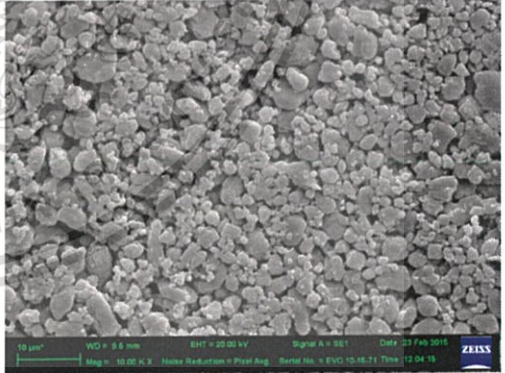
(ค)x=0.25



(ง)x=0.25

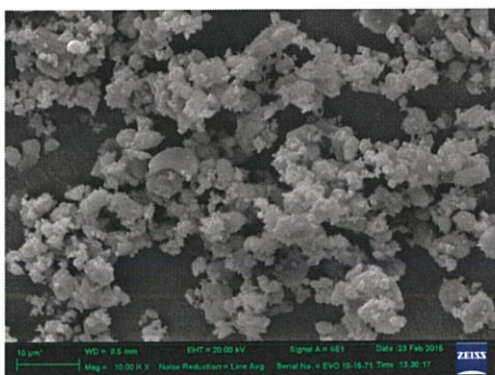


(จ)x=0.50

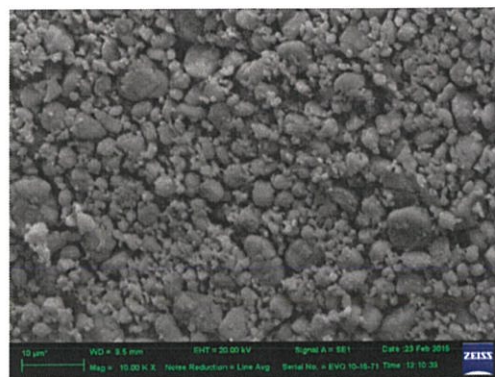


(ฉ)x=0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)x=1.00



(ง)x=1.00

รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM (ก), (ค), (จ) และ (ข) แสดงสัณฐานวิทยาของผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ (ข), (ง), (ฉ) และ (ช) แสดงเม็ดเซรามิกส์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50$ และ 1.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$	ขนาดอนุภาค (μm)	ขนาดผลึก (nm)
$x=0.00$	1.17	70.89
$x=0.25$	1.51	66.24
$x=0.50$	1.65	59.81
$x=1.00$	1.76	56.54

จากรูปที่ 4.5 (ก), (ค), (จ) และ (ข) พบว่าผลึกของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ที่ได้จากการเผาแคลไซน์ มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 1.17-1.76 ไมโครเมตร ส่วนในรูปที่ 4.5 (ข), (ง), (ฉ) และ (ช) เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ได้จากการเผาซินเตอร์ โครงสร้างทางกายภาพมีความเป็นรูพรุนและมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อน และขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ แสดงดังตารางที่ 4.4

4.3 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึก และสัณฐานวิทยาของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$

4.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

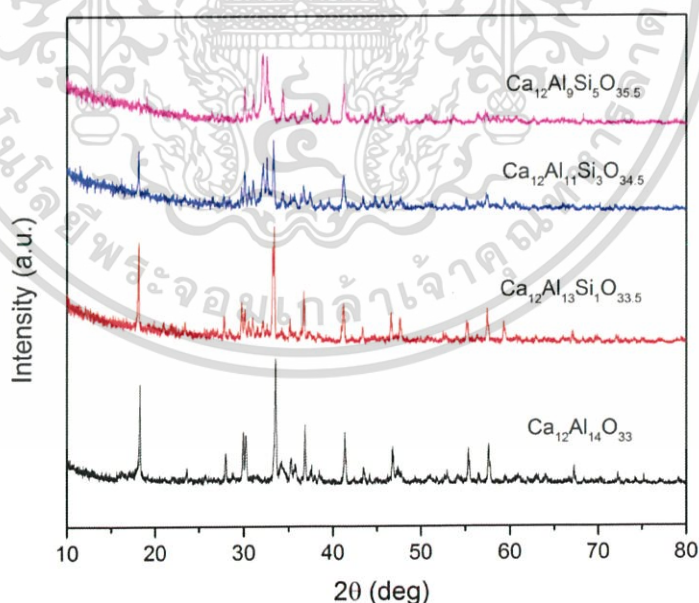
เมื่อทำการเจือสาร SiO_2 ไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{x-1}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ โดยทำการกำหนดอัตราส่วน $x = 1.00$ พบว่าเกิดการเลื่อนตำแหน่งของ 2θ ของแต่ละพีคจากพีคมาตรฐาน และสามารถยืนยันการเข้าไปในโครงสร้างคิวบิกด้วยการแสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกในตารางที่ 4.7 และพบลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.1, 23.4, 27.8, 29.7, 33.3, 35.1, 36.6, 41.1, 46.6, 52.8, 55.1, 57.4 และ 67.0 โดยพีคการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

ส่วนเมื่อเจือสาร SiO_2 ที่อัตราส่วน $x=3.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 11 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.1, 23.4, 27.8, 29.7, 33.3, 35.1, 36.6, 41.1, 46.6, 55.1 และ 57.4 พบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 31.10 และ 37.48 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691 และพบการเลี้ยวเบนของ SiO_2 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 39.53 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8951

เมื่อเจือสาร SiO_2 ที่อัตราส่วน $x=5.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 7 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.1, 23.4, 29.7, 35.1, 36.6, 41.1 และ 57.4 พบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 3 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 31.10, 37.48 และ 53.70 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691 และพบการเลี้ยวเบนของ SiO_2 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 39.53 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8951

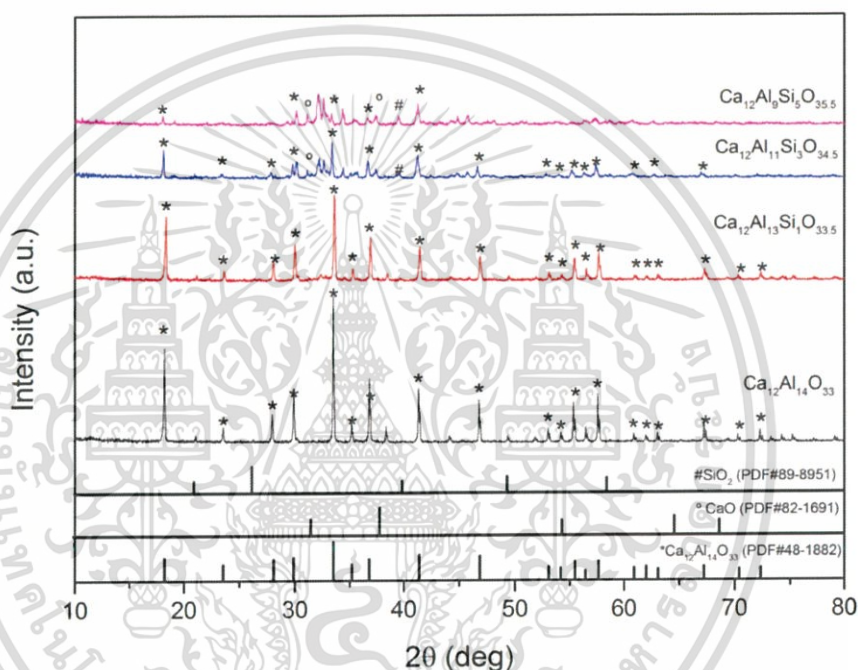


รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติกิจวิธานะของแข็งที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงรัศมีไอออนิกของอะตอมชนิดต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ [17]

Atomic type	Ionic radius (Å)
Ca	1.00
Al	0.53
Si	0.40
O	1.40



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็งที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการอัดเม็ดและทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ชัดเจนขึ้น จากรูปที่ 4.7 พบว่า เม็ด $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 23.5, 27.9, 29.9, 33.5, 35.2, 36.8, 38.3, 41.3, 44.1, 46.7, 49.3, 52.9, 54.1, 55.3, 56.4, 57.5, 60.8, 61.9, 63.0, 67.2, 70.2 และ 72.2 องศา โดยพิคการเลี้ยวเบนทั้งหมดตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

และเมื่อทำการเจือสาร SiO_2 ไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ โดยทำการกำหนดอัตราส่วน $x = 1.00$ พบว่าเม็ดเซรามิกส์ยังคงมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ โดยมีระนาบมุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 23.5, 27.9, 29.9, 33.5, 35.2, 36.8, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38.3, 41.3, 44.1, 46.7, 49.3, 52.9, 54.1, 55.3, 56.4, 57.5, 60.8, 61.9, 63.0, 67.2, 70.2 และ 72.2 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 48-1882

เมื่อเจือสาร SiO_2 ที่อัตราส่วน $x = 3.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 20 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 23.5, 27.9, 29.9, 33.5, องศา การเลี้ยวเบนของ SiO_2 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 39.53 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8103 และพบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 31.10 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691

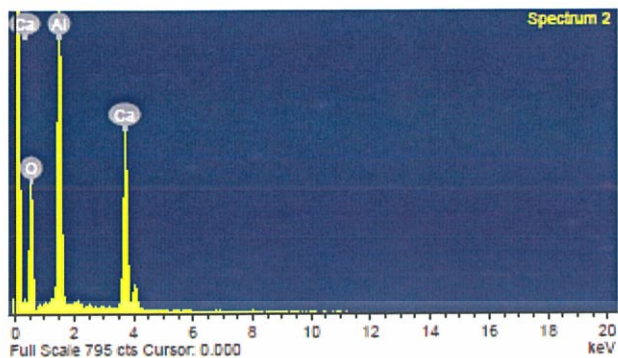
เมื่อเจือสาร SiO_2 ที่อัตราส่วน $x = 5.00$ พบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 5 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 18.2, 29.9, 33.5, 36.8 และ 41.3 องศา การเลี้ยวเบนของ SiO_2 มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 1 พีค คือที่มุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 39.53 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 89-8103 และพบการเลี้ยวเบนของ CaO มีระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏ 2 พีค คือมุมที่เลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 31.10 และ 37.48 องศา โดยพีคการเลี้ยวเบนตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระบุในชุดข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 82-1691 และยังพบอีกว่า เมื่อทำการเจือสารเพิ่มขึ้น จะมีเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ ขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการขยายตัวของผลึก ดังแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และขนาดผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x=0.00, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	ค่าคงที่โครงผลึก a (Å)	ขนาดผลึก (nm)
X=0.00	11.9844	-
X=0.00	11.9854	70.89
X=1.00	12.1062	51.79
X=3.00	11.8605	47.27
X=5.00	11.9708	40.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

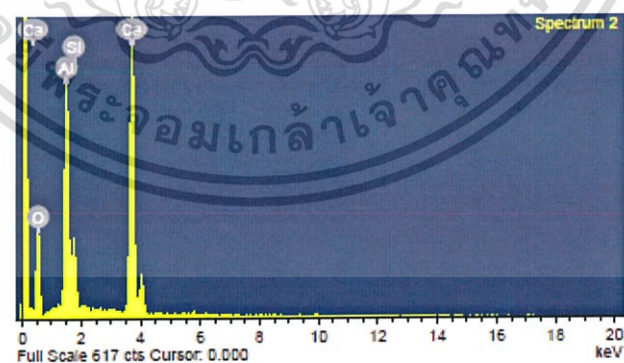
4.3.2 การวิเคราะห์สัณฐานด้วยภาพ EDX



(ก)x=0.00

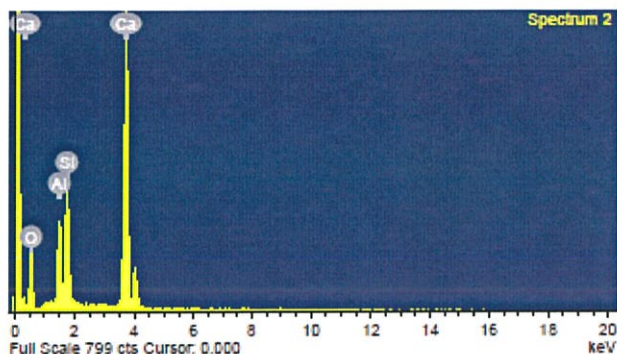


(ข)x=1.00



(ค)x=3.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)x=5.00

รูปที่ 4.8 สเปกตรัมอัตราส่วนของอะตอมจาก EDX ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$
(ก)x=0.00 (ข) 1.00 (ค) 3.00 และ(ง) 5.00 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

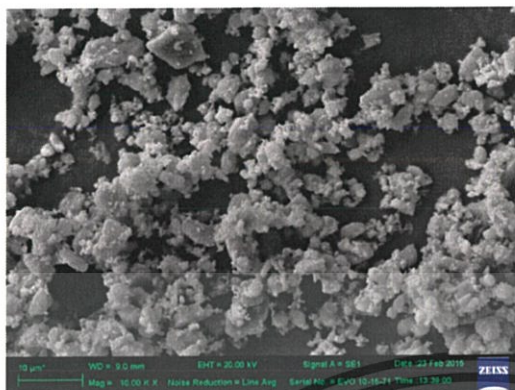
ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.8 ปรากฏพบว่า ปริมาณอะตอมของ Si ที่เจือเข้าไปใกล้กับจาก
ทฤษฎีดังแสดงในตาราง ที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอะตอม Ca, Al, Si และ O สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$
(x=0.00, 1.00, 3.00 และ 5.00)

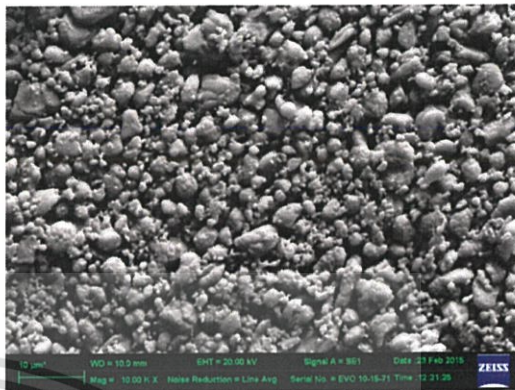
$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	คำนวณ (Atomic%)				EDX (Atomic%)			
	Ca	Al	Si	O	Ca	Al	Si	O
x=0.00	20.33	23.0	-	55.9	10.13	16.62	-	73.25
x=1.00	20.16	21.8	1.68	56.3	15.32	16.44	0.76	67.48
x=3.00	19.83	18.1	4.95	57.0	16.08	13.00	4.27	66.66
x=5.00	19.51	14.6	8.13	35.5	20.35	6.06	8.42	65.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

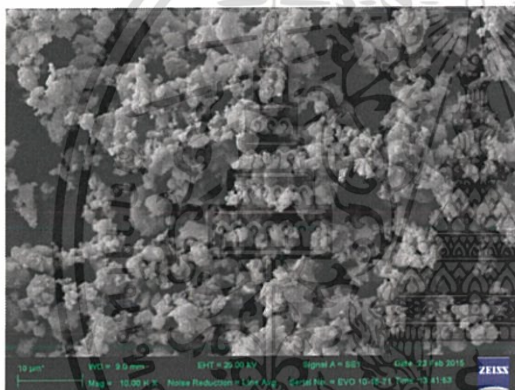
4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



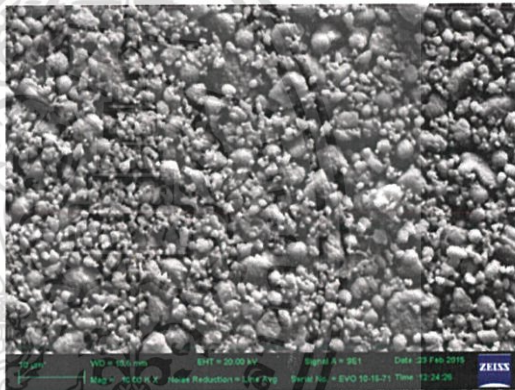
(ก)x=1.00



(ข)x=1.00

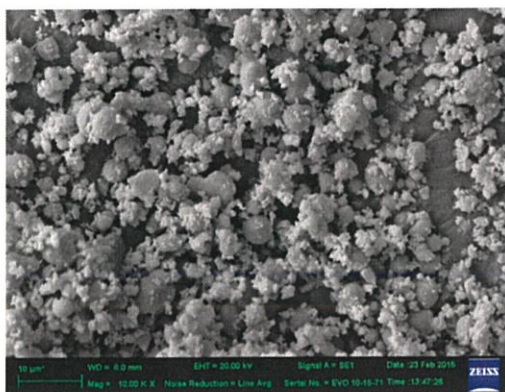


(ค)x=3.00

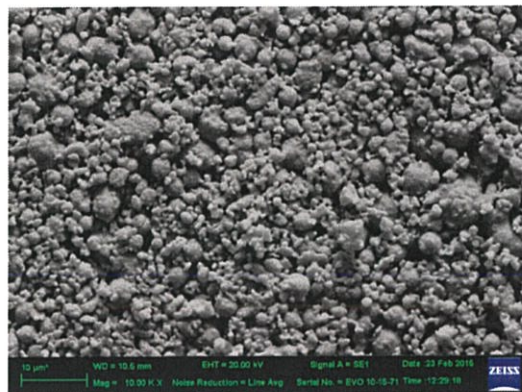


(ง)x=3.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)x=5.00



(ค)x=5.00

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM (ก), (ค) และ (จ) แสดงสัณฐานวิทยาของผงผลึกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ และ (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงเม็ดเซรามิกส์ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ตารางที่ 4.8 แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x=0.00, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

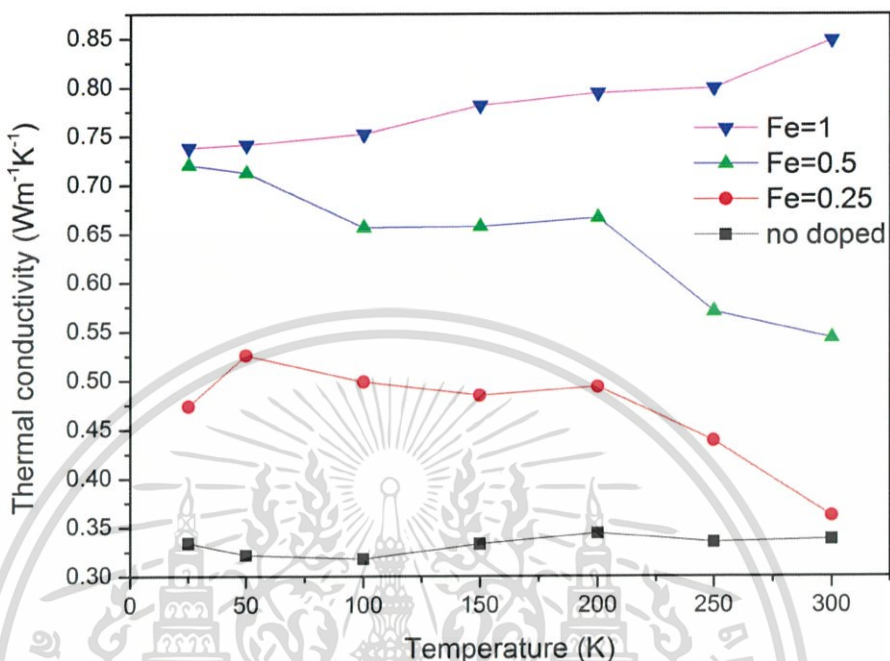
$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$	ขนาดอนุภาค (μm)	ขนาดผลึก (nm)
x=0.00	1.17	70.89
x=1.00	1.58	51.79
x=3.00	1.12	47.27
x=5.00	1.02	40.64

จากรูปที่ 4.9 (ก), (ค) และ (จ) พบว่าผงผลึกของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ที่ได้จากการเผาแคลไซน์ มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 1.02-1.58 ไมโครเมตร ส่วนในรูปที่ 4.5 (ข), (ง) และ (ฉ) เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ได้จากการเผาซินเตอร์ โครงสร้างทางกายภาพมีความเป็นรูพรุนและมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อน และขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ แสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สมบัติเชิงความร้อน

ในงานวิจัยนี้สิ่งที่พิจารณาคือค่าสภาพการนำความร้อน K



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง K (W/mK) กับ T (K) ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x=0.00, 0.25, 0.50$ และ 1.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

สำหรับค่าการนำความร้อน K ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x = 0.00, 0.25, 0.50$ และ 1.00) ถูกวัดในช่วงอุณหภูมิจาก 25 K ถึง 300 K เพราะเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 4.10

จากผลการทดลองสามารถอธิบายตามผลการเจอได้ดังนี้

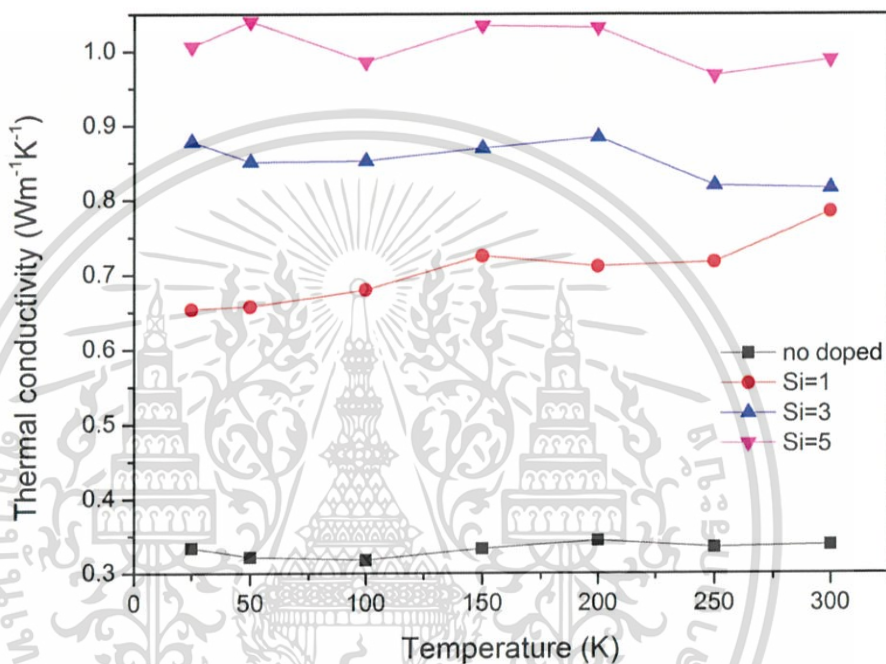
ที่ $x = 0.00$ จะมีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุด อาจเป็นเพราะว่ามีรูพรุนเยอะและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.31-0.34 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ 100 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 250 K

ที่ $x = 0.25$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.50-0.67 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ 300 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $x = 0.50$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.55-0.72 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 300 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 K

ที่ $x = 1.00$ จะมีค่าการนำความร้อนสูงสุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.66-0.77 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 25 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 300 K



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง K (W/mK) กับ T (K) ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x=0.00, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

สำหรับค่าการนำความร้อน K ของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x = 0.00, 1.00, 3.00$ และ 5.00) ถูกวัดในช่วงอุณหภูมิจาก 25 K ถึง 300 K เพราะเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 4.11

จากผลการทดลองสามารถอธิบายตามผลการเจอได้ดังนี้

ที่ $x = 0.00$ จะมีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุด อาจจะเป็นเพราะว่ามีรูพรุนเยอะและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.31-0.34 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 100 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 250 K

ที่ $x = 1.00$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.65-0.78 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 25 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 300 K

ที่ $x = 3.00$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.81-0.88 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 300 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 K

ที่ $x = 5.00$ จะมีค่าการนำความร้อนสูงสุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.96-1.04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งพบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยสุดที่อุณหภูมิ 250 K และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 K



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษสมบัติเชิงวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ($x = 0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00) และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ($x = 1.00, 3.00$ และ 5.00) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างทั้งหมดถูกตรวจสอบและวิเคราะห์โดยการวัดพฤติกรรมทางความร้อน วัดสมบัติเชิงโครงสร้างผลึกและวัดสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป โดยผลการตรวจสอบมีดังนี้

1. พฤติกรรมทางความร้อน

1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA/DTG) เป็นการตรวจสอบเพื่อกำหนดช่วงอุณหภูมิการเผาแคลไซต์ ซึ่งพบว่า การเผาแคลไซต์ของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ สามารถเผาได้ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสขึ้นไป

2. สมบัติเชิงโครงสร้างผลึก

2.1 X-ray Diffraction (XRD) ได้แก่สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ และ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ พบว่า เมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 เข้าไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ โดยที่ $x = 0.25, 0.50$ และ 1.00 นั้นพบเฟสของ Fe_2O_3 ที่เข้าไปผสมในโครงสร้างผลึกของเมเนไตต์ และก็ยังคงแสดงโครงสร้างของเมเนไตต์ อยู่ด้วย แต่ในอัตราที่ $x = 3.00$ และ 5.00 พบว่าไม่พบเฟสของ Fe_2O_3 ในโครงสร้างของเมเนไตต์

และเมื่อทำการเจือสาร SiO_2 เข้าไปในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ โดยที่ $x = 1.00, 3.00$ และ 5.00 นั้นพบเฟสของ SiO_2 ที่เข้าไปผสมในโครงสร้างผลึกของเมเนไตต์ทั้งหมด และก็ยังคงแสดงโครงสร้างของเมเนไตต์ อยู่ด้วย

2.2 การวิเคราะห์สัดส่วนด้วยภาพ EDX พบว่า เมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 ที่ $x=0.00, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00$ และ 5.00 เข้าไปในโครงสร้างของเมเนไตต์ พบว่ายิ่งเจือมากขึ้นจำนวนอะตอมของ Fe_2O_3 ก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และทั้งการเจือด้วย SiO_2 ที่ $x = 1.00, 3.00$ และ 5.00 ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ในส่วนของการเจือ Fe_2O_3 ที่ $x = 1.00$ จะมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดถึง 1.76 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคที่ไม่เจือถึง 0.59 ไมโครเมตร แต่ในทางกลับกันขนาดของผลึกนั้นหากยิ่งเจือสารมากขนาดผลึกจะยิ่งเล็กลง ซึ่งที่ $x = 1.00$ นั้นมีขนาดผลึกเล็กกว่าผลึกที่ไม่เจือถึง 14.35 นาโนเมตร

และในส่วนของการเจือ SiO_2 ที่ $x = 1.00$ จะมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดถึง 1.58 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคที่ไม่เจือถึง 0.41 ไมโครเมตร แต่ในทางกลับกันขนาดของผลึกนั้นหากยิ่งเจือสารมากขนาดผลึกจะยิ่งเล็กลง ซึ่งที่ $x = 1.00$ นั้นมีขนาดผลึกเล็กกว่าผลึกที่ไม่เจือถึง 30.25 นาโนเมตร

สรุปรวมได้ว่ายิ่งทำการเจือสารมากขึ้นจะทำให้ขนาดผลึกเล็กลงแต่ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้น

3. สมบัติเชิงความร้อน

เมื่อทำการเจือสาร Fe_2O_3 และ SiO_2 พบว่าค่า K จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จากการเจือ Fe_2O_3 ที่ $x = 0.25$, 0.50 และ 1.00 ค่า K จะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและจะมีค่ามากที่สุดที่ $x = 1.0$ ซึ่งก็คืออยู่ในช่วง $0.66\text{-}0.77 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ และที่อุณหภูมิ 300 K และจากการเจือ SiO_2 ที่ $x = 1.00$, 3.00 และ 5.00 ค่า K จะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและจะมีค่ามากที่สุดที่ $x = 5.00$ ซึ่งก็คืออยู่ในช่วง $0.96\text{-}1.04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ และที่อุณหภูมิ 50 K

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Fe}_x\text{O}_{33}$ ที่ $x = 3.00$ และ 5.00 พบว่า พบเฟสของสารอื่นที่เจือเข้าไปในสารประกอบเมไนต์ ซึ่งทำให้ทราบว่า ต้องทำการเจือในอัตราส่วนที่น้อยกว่า 1.00 ส่วนการสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14-x}\text{Si}_x\text{O}_{33+x/2}$ ที่ $x = 5.00$ พบว่า พบเฟสของสารอื่นที่เจือเข้าไปในสารประกอบเมไนต์ ซึ่งทำให้ทราบว่า ต้องทำการเจือในอัตราส่วนที่น้อยกว่า 5.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

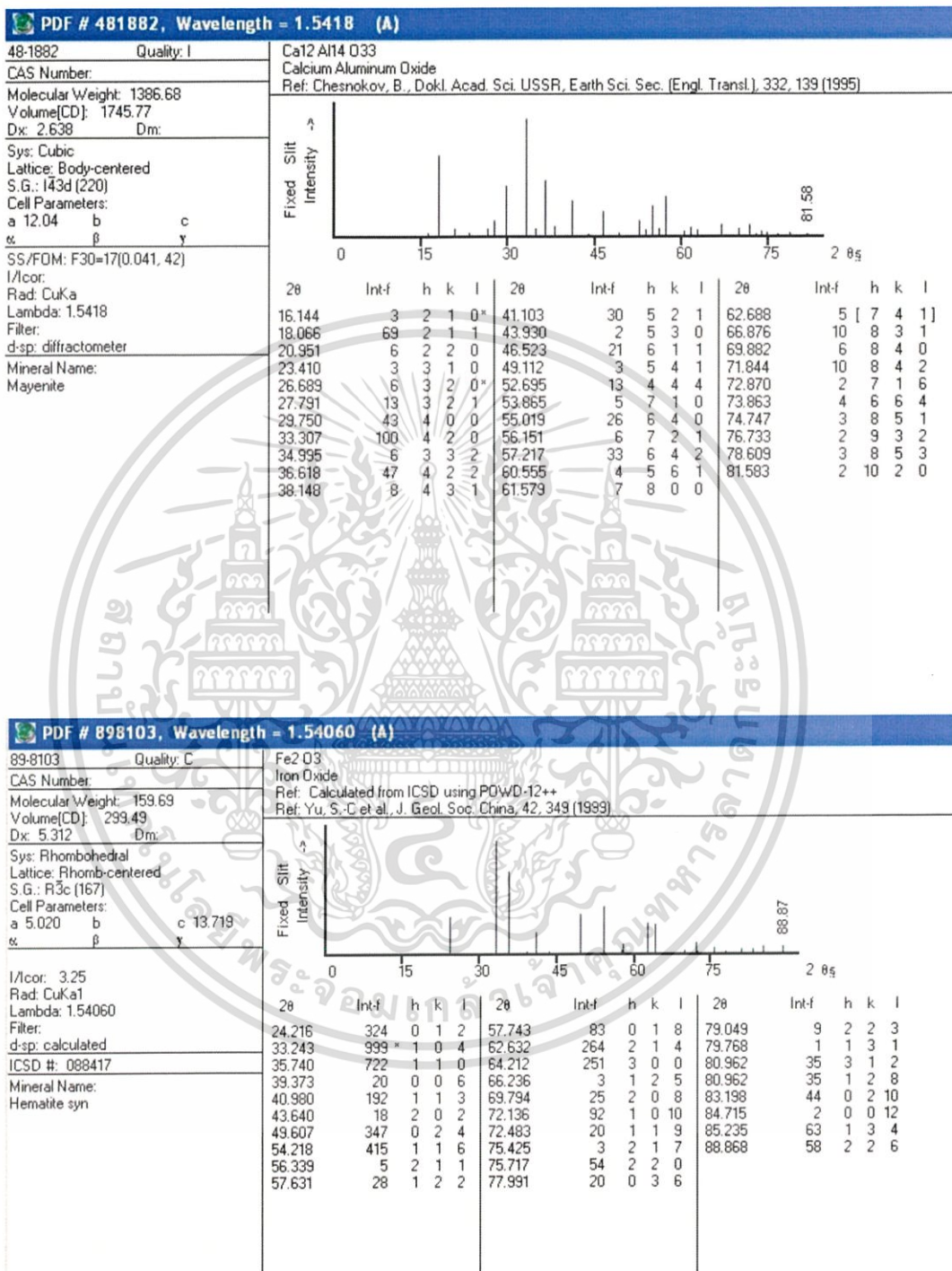
- [1] มินรญา สงวนชีพ. 2558. “การประดิษฐ์และการหาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของเซรามิกส์แคลเซียมโคบอลไทต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] เฉลิมพล รุจรดาวงค์. 2557. “ศึกษาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบดีลาฟอสไซด์ $\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ($x=0.00-0.05$).” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] นราธิป วิทยากร. เทคนิคการเลี้ยงเบนริงส์เอ็กซ์. ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2552
- [4] นภัทร์พร เพชรน้อย. “การศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของเซรามิกส์ออกไซด์เพอโรสไกต์ที่เจือไนโอเบียม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [5] ทศวรรษ สีตะวัน. 2556. เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก. พิมพ์ครั้งที่ 2. สกลนคร : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
- [6] เผ่าเทพ พิชญุชกร, “เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก,” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (2002)
- [7] Sabina Nwamaka Ude. 2010. “The Synthesis and Crystal Chemistry of $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ doped with Fe_2O_3 .” Master of science, The University of Tennessee, Knoxville
- [8] High-Temperature CO_2 Capture by CaO-Containing Hydroxide Wun-Syong Chen, Ching-Tsung Yu Science of Advanced Materials 08/2014; 8(8). DOI: 10.1166/sam. 2014. 1944
- [9] BJ Ingram, M.I. Berito. K. R. Poeppelmeier, T.O Mason Point defect and transport in transparent conducting oxides of intermediate conductivity, Science direct 2005, 86-93
- [10] <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-electron-microscopysem-.html>
- [11] http://www.ccprocessproducts.com/media/catalog/customfield/ZEM3_Product_Data_Sheet.pdf
- [12] http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/mat30355np_ch2.pdf
- [13] www.kyoto-kem.com/en/learn/heat/heat03
- [14] www.wintronics.myreadyweb.com/article/topic_46975.html
- [15] http://www.en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck
- [16] www.globalspec.com/RefArticleImages/14c30B12BB33EFDB238326585A818CDB_07_20.gif
- [17] <http://abulafia.mt.ic.ac.uk/shannon/radius.php>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

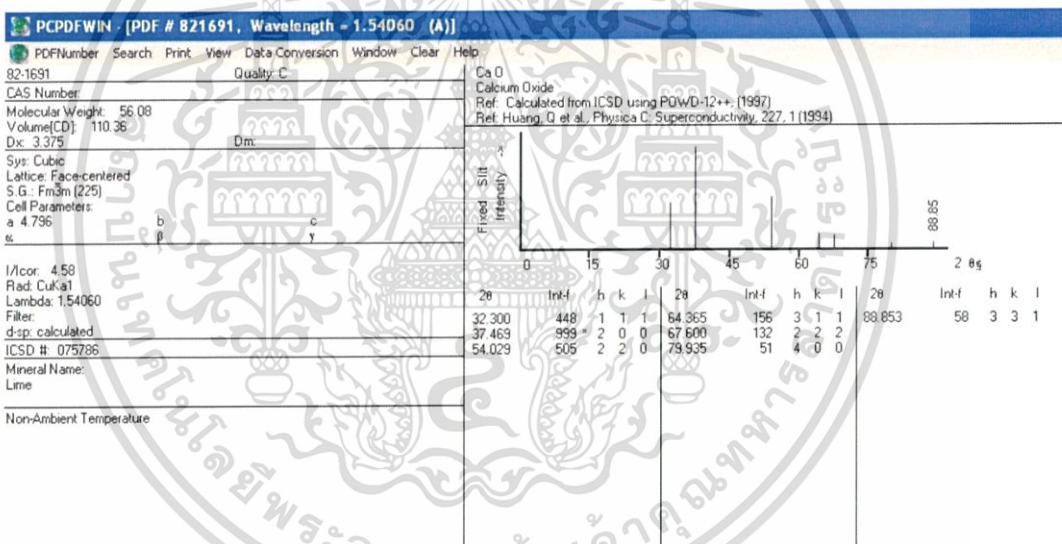
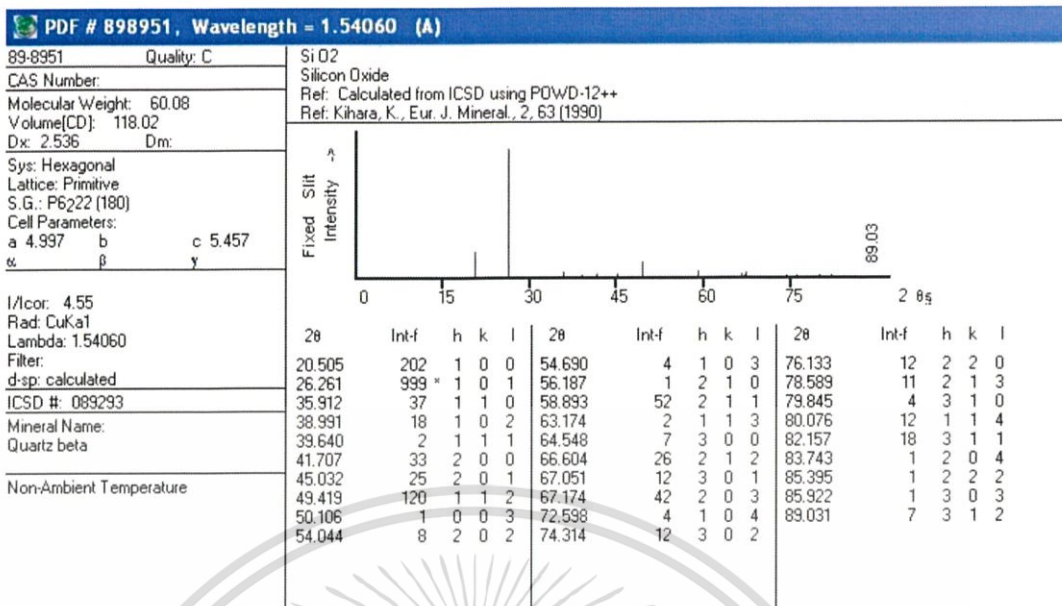


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แบบ วศ.1



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง

Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (NO DOPED)

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01300.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.334
50	0.322
100	0.318
150	0.333
200	0.344
250	0.335
300	0.338

ชื่อผู้ให้บริการ ดร.เชษฐา รัตนพันธ์
 ที่อยู่ผู้ให้บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ถนนปอโลกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 ลักษณะตัวอย่าง วัสดุแผ่นกลมสีขาว
 วันที่ทดสอบ 12 มีนาคม 2558
 วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกรัฐ มีชูวาศ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสาวปรีดา จำปีเรือง)

นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
 ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

-Rin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (Doped with $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.25$)

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01301.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.621
50	0.673
100	0.646
150	0.632
200	0.641
250	0.586
300	0.509

ผู้ให้บริการ ดร.เชษฐา รัตนพันธ์

ที่อยู่บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

ลักษณะตัวอย่าง วัสดุแผ่นกลมสีขาว

วันที่ทดสอบ 12 มีนาคม 2558

วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกรัฐ มีชูวาศ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสงขลปรีดา จำปีเรือง)

นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 วาซเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

2/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัสดุตัวอย่าง

$\text{Ca}_{1.2}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (Doped with $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.5$)

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01302.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.727
50	0.719
100	0.663
150	0.664
200	0.673
250	0.577
300	0.550

ชื่อผู้ให้บริการ ดร. เศรษฐา รัตนพันธ์
 ที่อยู่ให้บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 ลักษณะตัวอย่าง วัสดุแผ่นกลมสีเขียว
 วันที่ทดสอบ 12 มีนาคม 2558
 วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกวิทย์ มีชูชาติ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสาวปริดา จำปีเรือง)

นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะ วัสดุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัสดุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
 ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

๒๕๕๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัสดุตัวอย่าง

$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{35}$ (Doped with $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1$)

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01303.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.662
50	0.665
100	0.676
150	0.705
200	0.718
250	0.723
300	0.772

ชื่อผู้ให้บริการ ดร.เชรชฎา รัตนพันธ์
 ที่อยู่ผู้ให้บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520.
 ลักษณะตัวอย่าง วัสดุแผ่นกลมสีเขียว
 วันที่ทดสอบ 13 มีนาคม 2558
 วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกวิรุฒิ มีชูวาต)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสาวปรีดา จำปีเรือง)
 นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
 ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัสดุตัวอย่าง

$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ (Doped with $\text{SiO}_2 = 1$)

เครื่องหมาย / ตรา

-

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01304.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.654
50	0.658
100	0.680
150	0.725
200	0.711
250	0.717
300	0.784

ชื่อผู้ให้บริการ: ดร.เชษฐา รัตนพันธ์

ที่อยู่ให้บริการ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนจตุรพักตรพิมาน เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

ลักษณะตัวอย่าง: วัสดุแผ่นกลมสีขาว

วันที่ทดสอบ: 13 มีนาคม 2558

วิธีทดสอบ: ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกวิรุฒิ มีชูชาติ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสาวปริดา จำปีเรือง)

นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัสดุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2 ๒/๑๓๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง
Ca₁₂Al₁₄O₃₃(Doped with SiO₂ = 3)

เครื่องหมาย / ตรา


หมายเลขปฏิบัติการ
L58/01305.1

ผลการทดสอบ


อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	0.878
50	0.851
100	0.852
150	0.869
200	0.884
250	0.819
300	0.815

ชื่อผู้ให้บริการ ดร.เชรชญา รัตนพันธ์
ที่อยู่ให้บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลอมกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ลักษณะตัวอย่าง ก้อนแผ่นกลมสีขาว
วันที่ทดสอบ 13 มีนาคม 2558
วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง


(นายเอกวิทย์ มีชูชาติ)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน


(นางสาวปรีดา จำปีเรือง)
นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะ วัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง

$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ (Doped with $SiO_2 = 5$)

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

L58/01306.1

ผลการทดสอบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าการนำความร้อน, (W/(m*K))
25	1.006
50	1.040
100	0.985
150	1.034
200	1.031
250	0.967
300	0.988

ชื่อผู้ให้บริการ ดร.เชษฐา รัตนพันธ์

ที่อยู่ผู้ให้บริการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนคลองกรัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

ลักษณะตัวอย่าง วัสดุแผ่นกลมสีขาว

วันที่ทดสอบ 16 มีนาคม 2558

วิธีทดสอบ ASTM E1461-13

ผู้รับรอง

(นายเอกรัฐ มีชูวาท)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน

(นางสาวปริดา จำปีเรือง)

นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดลอกใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

๒๖๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค



University of Tennessee, Knoxville
Trace: Tennessee Research and Creative
Exchange

Masters Theses

Graduate School

8-2010

The Synthesis and Crystal Chemistry of $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ doped with Fe_2O_3

Sabina Nwamaka Ude
University of Tennessee - Knoxville, sude@utk.edu

Recommended Citation

Ude, Sabina Nwamaka, "The Synthesis and Crystal Chemistry of $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ doped with Fe_2O_3 ." Master's Thesis, University of Tennessee, 2010.
http://trace.tennessee.edu/utk_gradha/755

This Thesis is brought to you for free and open access by the Graduate School at Trace, Tennessee Research and Creative Exchange. It has been accepted for inclusion in Masters Theses by an authorized administrator of Trace, Tennessee Research and Creative Exchange. For more information, please contact trace@utk.edu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้