

การเตรียมและสมบัติของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมด้วยวิธีดั้งเดิมสำหรับการ  
นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกลางบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

PREPARATION AND PROPERTIES OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS BY  
CONVENTIONAL METHOD FOR MAGNETIC RECORDING MEDIA



ทัชชกร ศักดิ์แก้ว

TATCHAKORN SAKKAEW

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND PROPERTIES OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS BY  
CONVENTIONAL METHOD FOR MAGNETIC RECORDING MEDIA



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING

IN NANOMATERIAL ENGINEERING

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

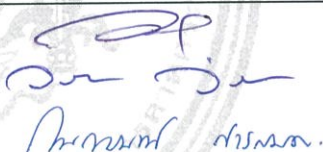
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ


หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและสมบัติของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมด้วยวิธีดั้งเดิมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้  
งานเป็นตัวอย่างบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

Special Project Title Preparation And Properties Of Cobalt-Chromium Alloys By Conventional  
Method For Magnetic Recording Media

นักศึกษา นายทัชชกร ศักดิ์แก้ว  
รหัสประจำตัว 55110020  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรรณวิทย์ วิทยากร  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา ผศ.ดร.วรรณวิทย์ วิทยากร ผศ.ดร. กนกนันทน์ ภาชีรักษ์	 Prof. Dr. Wisanu Phetraka

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุดิไพจิตร)  
หัวหน้าภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี  
วันที่..... 13 ..... เดือน..... มิถุนายน ..... พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและสมบัติของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม ด้วยวิธีดั้งเดิมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกลางบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

นักศึกษา

นาย ทัชชกร ศักดิ์แก้ว

รหัสประจำตัว

55110020

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. วรณวิไล วิทยาการ

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์อัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  ที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  ให้อยู่ในรูปของเม็ดอัลลอยด้วยเทคนิคการเตรียมผงแบบดั้งเดิม และตามด้วยการซินเตอร์ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) พร้อมทั้งศึกษาผลของตัวแปรในระหว่างกระบวนการเตรียมที่มีต่อเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วัดสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness tester) รวมไปถึงวัดสมบัติแม่เหล็กของอัลลอย Co-Cr ด้วยเครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กด้วยหลักการสั่น (VSM) จากผลการทดลองที่ได้พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงการอยู่ร่วมกันของเฟสโคบอลต์และโครเมียม จากการตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของผงโคบอลต์-โครเมียมพบว่าอนุภาคของโคบอลต์มีลักษณะเป็นแบบแท่ง ส่วนอนุภาคของโครเมียมจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคโคบอลต์โดยจะมีลักษณะเป็นก้อนหลายเหลี่ยม ทั้งนี้ค่าความแข็งของบริเนลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของอัลลอยทั้งหมดพบว่าที่สัดส่วน  $x = 0, 10, 20$  แสดงผลทางแม่เหล็กปรากฏเป็นวงวนฮีสเทอรีซิสแบบเฟอร์โรแมกเนติก

คำสำคัญ : โคบอลต์ โครเมียม ซินเตอร์ ตัวกลางบันทึกข้อมูล สมบัติแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	PREPARATION AND PROPERTIES OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS BY CONVENTIONAL METHOD FOR MAGNETIC RECORDING MEDIA
Student	Mr. Tatchakorn Sakkaew
Student ID	55110020
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn

### Abstract

In this study, the cobalt-chromium alloys with the system  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  where  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  and  $100$  were fabricated by conventional processing and sintered in argon (Ar) atmosphere. The effect of chemical composition on phase formation was analyzed by X-ray diffractometer (XRD). Microstructures and grain morphologies were characterized by scanning electron microscope (SEM). The Brinell hardness tester was selected to investigate the mechanical properties of samples. The results from X-ray diffractometer (XRD) reveal the coexistence of cobalt phase and chromium phase in the X-ray diffraction patterns. Scanning electron microscope (SEM) illustrates the morphology of cobalt-chromium powders which confirmed the rod-like particles are cobalt and the polygon powders are chromium. Brinell hardness test for all samples shows that HB value increases with increasing chromium content. Moreover, vibrating sample magnetometer represents magnetic properties of samples at composition  $x = 0, 10$  and  $20$ , and shows as ferromagnetic hysteresis loops.

**Keywords :** Cobalt, chromium, sintering, record media, magnetic property

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วรณวิสัย วิทยาการ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา และ ผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรักษ์ กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่าง ๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พงศกร จันทรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยเทคนิคการสั่น (VSM)

ขอขอบคุณ นางสาว ญัฐกานต์ พูลผล และสมาชิกในหน่วยวิจัยเซรามิกชั้นสูงทุก ๆ ท่านที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ตลอดจนมิตรภาพที่ได้รับตลอดการศึกษาในระดับปริญญาตรีนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณแม่ และ สมาชิกในครอบครัวทุก ๆ ท่าน ที่เป็นกำลังใจสำคัญทำให้ข้าพเจ้าได้สำเร็จการศึกษาอย่างที่ตั้งใจไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 ความสำคัญ ที่มา และปัญหาของงานวิจัย	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี สมมติฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และ อัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)	6
2.1.1 โคบอลต์ (Cobalt; Co)	6
2.1.2 โครเมียม (Chromium; Cr)	7
2.1.3 โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)	9
2.1.4 การนำ Co-Cr ไปใช้งานทางฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	10
2.2 เทคนิคการเตรียมสาร	17
2.2.1 เทคนิคการอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง	17
2.2.2 กระบวนการซินเตอร์ในบรรยากาศ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์	20
2.3.1 เทคนิคตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.3.3 เทคนิคการตรวจสอบสมบัติแม่เหล็ก	24
2.3.4 เทคนิควัดความแข็งแบบบริเนลล์	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 สารเคมีที่ใช้	27
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	27
3.3 กระบวนการเตรียมผง	28
3.3.1 โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)	28
3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดอัลลอย	30
3.4.1 เทคนิคการอัดขึ้นรูปเม็ดอัลลอย	30
3.4.2 การเผาซินเตอร์ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน	33
3.5 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ	35
3.5.1 ความหนาแน่น	35
3.5.2 เพอร์เซ็นต์การหดตัว	36
3.6 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	37
แบบส่องกราด	
3.8 การตรวจสอบค่าความแข็งด้วยเทคนิคการกดแบบบริเนลล์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 การตรวจสอบสมบัติทางแม่เหล็ก	39
3.9.1 เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กของสารด้วยหลักการสั่น (VSM)	39
บทที่ 4 ผลการวิจัย	41
4.1 สมบัติกายภาพ	41
4.1.1 ค่าความหนาแน่นภายหลังการเผา	41
4.1.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัวภายหลังการเผา	43
4.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)	44
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา	45
4.4 สมบัติเชิงกล	51
4.5 สมบัติแม่เหล็ก	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก ก	60

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย ประจำภาคเรียนที่ 1	4
1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย ประจำภาคเรียนที่ 2	5
2.1 สมบัติอะตอมของ Co	6
2.2 สมบัติทางกายภาพของ Co	7
2.3 สมบัติทางกายภาพของ Cr	8
2.4 สมบัติอะตอมของ Cr	9
4.1 ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ของเม็ดอัลลอย $Co_{100-x}Cr_x$	41
4.2 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ของเม็ดอัลลอย $Co_{100-x}Cr_x$	42
4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอย Co-Cr ในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ โดยที่ $x = 0\ 10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60\ 70\ 80\ 90$ และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	43
4.4 ขนาดเกรนของเม็ดอัลลอย ในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ โดยที่ $x = 0\ 10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60$	48
4.5 ค่าความแข็งบริเนลล์ของเม็ดอัลลอยในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$	51
4.6 ค่าความแข็งบริเนลล์ของเม็ดอัลลอยในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ ค่า แมกนีไตเซชันสูงสุด (Ms) ค่าสนามแม่เหล็กกลับข้าง (Hc) และค่าแมกนีไตเซชันคงค้าง (Mr) ของเม็ดอัลลอย ในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ โดยที่ $x = 0\ 10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60\ 70\ 80\ 90$ และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	54

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 วิวัฒนาการของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	1
1.2 แสดงขนาดของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เล็กลงแต่บรรจุข้อมูลได้สูงขึ้น	2
2.1 แผนผังเฟสของอัลลอย Co-Cr	11
2.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้น	12
2.3 การเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุข้อมูลด้วยเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวอนกับเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวตั้ง	13
2.4 วงวนฮิสเทอรีซิสแม่เหล็กของสารในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ เมื่อ $0 < x < 100, \Delta x=10$	13
2.5 ค่าโพลารไรเซชันอิ่มตัวสูงสุด ( $J_s$ ) กับค่าสนามลบล้าง ( $H_C$ ) ที่สัมพันธ์กับปริมาณของโครเมียมของสารในระบบ $Co_{100-x}Cr_x$ เมื่อ $0 < x < 100, \Delta x=10$	14
2.6 แบบจำลองโครงสร้างจุลภาคแบบแท่งของ Co-Cr สำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง	15
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของฟิล์ม Co-Cr ที่มีปริมาณโครเมียมต่าง ๆ กับระยะเวลาที่ขึ้นงานอยู่ในบรรยากาศที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90 % ที่อุณหภูมิ 60 °ซ	16
2.8 หลักการทำงานของเทคนิคการอัดด้วยแรงทุกทิศทาง cold isostatic pressing	17
2.9 แผนภาพแสดงกลไกการซินเตอร์	19
2.10 แผนภาพการเกิดคอคอด (necking)	19
2.11 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาซินเตอร์	20
2.12 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกด	21
2.13 แผนภาพแสดงอิเล็กทรอนิกส์ที่หลุดออกจากชิ้นงานในระดับพลังงานต่าง ๆ	23
2.14 แผนภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	23

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.15 วงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็กและค่าต่าง ๆ	25
2.16 ภาพห้วงกุดและรอยกุดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	26
3.1 ครกหยกบดสาร	29
3.2 ตู้ดูดความชื้น	29
3.3 เครื่องอัดแกนเดียว	30
3.4 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน	31
3.5 เม็ดอัลลอย Co-Cr	31
3.6 เครื่องอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง	32
3.7 แผนภาพจำลองการอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง	33
3.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน	33
3.9 การจัดเรียงชิ้นงานในครุชีเบลสำหรับการซินเตอร์	34
3.10 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสารพร้อมระบบควบคุมบรรยากาศ	34
3.11 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	37
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
3.13 เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์	39
3.14 เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กของสารด้วยหลักการสั้น	40
3.15 วงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก	40
4.1 กราฟค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอยที่สัดส่วนต่าง ๆ	44
4.2 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของเม็ดอัลลอย Co-Cr ในระบบ $Co_{(100-x)}Cr_{(x)}$	45
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอย $Co_{(100-x)}Cr_{(x)}$ โดยที่ (A) $x = 0$ (B) $x = 10$ (C) $x = 30$ (D) $x = 50$ (E) $x = 70$ (F) $x = 90$ และ (G) $x = 100$	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

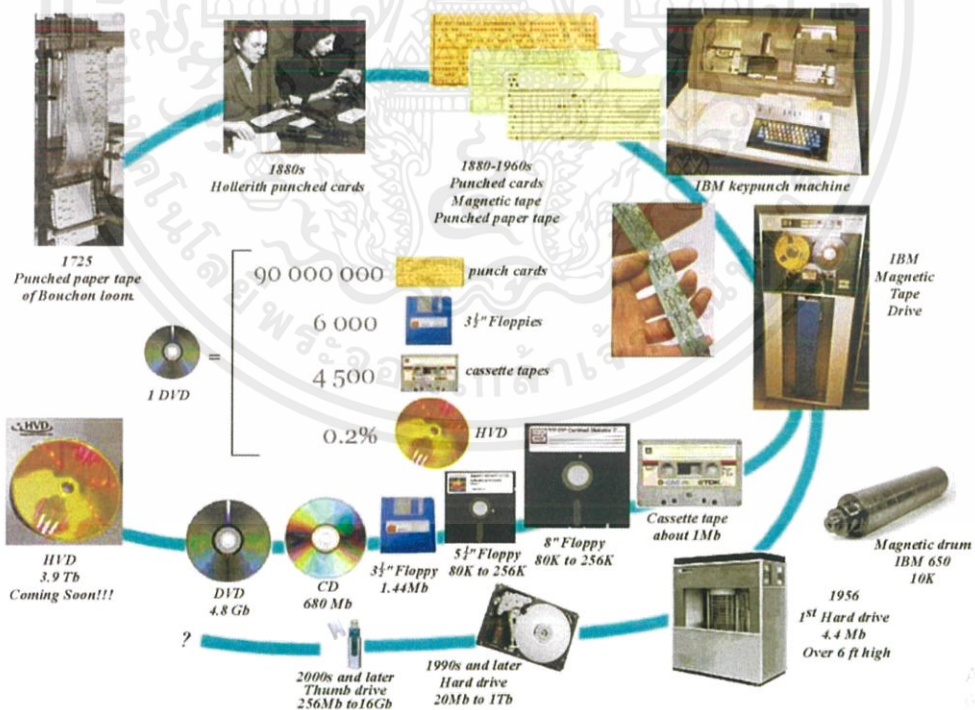
ภาพที่	หน้า
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอยในระบบ $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$ โดยที่ (A) $x = 0$ (B) $x = 10$ (C) $x = 30$ (D) $x = 50$ (E) $x = 70$ (F) $x = 90$ และ (G) $x = 100$ (ต่อ)	47
4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบ $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$ โดยที่ (A) $x = 0$ (B) $x = 10$ (C) $x = 30$ (D) $x = 50$ (E) $x = 70$ (F) $x = 90$ และ (G) $x = 100$	49
4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบ $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$ โดยที่ (A) $x = 0$ (B) $x = 10$ (C) $x = 30$ (D) $x = 50$ (E) $x = 70$ (F) $x = 90$ และ (G) $x = 100$ (ต่อ)	50
4.5 กราฟค่าความแข็งบรินเนลล์ของเม็ดอัลลอยในระบบ $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$	52
4.6 วรณฮีสเทอรีซิสลูปแม่เหล็กของเม็ดอัลลอยในระบบ $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล (data storage technology) จัดได้ว่ามีความจำเป็นและมีความสำคัญสำหรับมนุษย์ทุกเพศทุกวัย ทุกสาขาอาชีพ ไม่ว่าจะเป็นการจัดเก็บข้อมูลขององค์กรต่าง ๆ ข้อมูลส่วนบุคคล ข้อมูลของครอบครัว เช่น ภาพถ่าย ข้อมูลการซื้อขาย วิดีโอต่าง ๆ เพลง สื่อการเรียนการสอน ข้อมูลของบริษัทห้างร้านและอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการจัดเก็บข้อมูลมีความจำเป็นตั้งแต่ในระดับบุคคลทั่วไป จนรวมไปถึงระดับสังคม ระดับประเทศ และระดับโลก ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องการพื้นที่และความสามารถในการจัดเก็บและเรียกใช้ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในปัจจุบันทิศทางการพัฒนาของเทคโนโลยีกลุ่มนี้ จะเป็นการพยายามเพิ่มขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลให้สูงขึ้น ในขณะที่ขนาดเท่าเดิมหรือเล็กลงกว่าเดิมได้ยิ่งดี ดังที่แสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งเป็นภาพวิวัฒนาการขนาดของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล



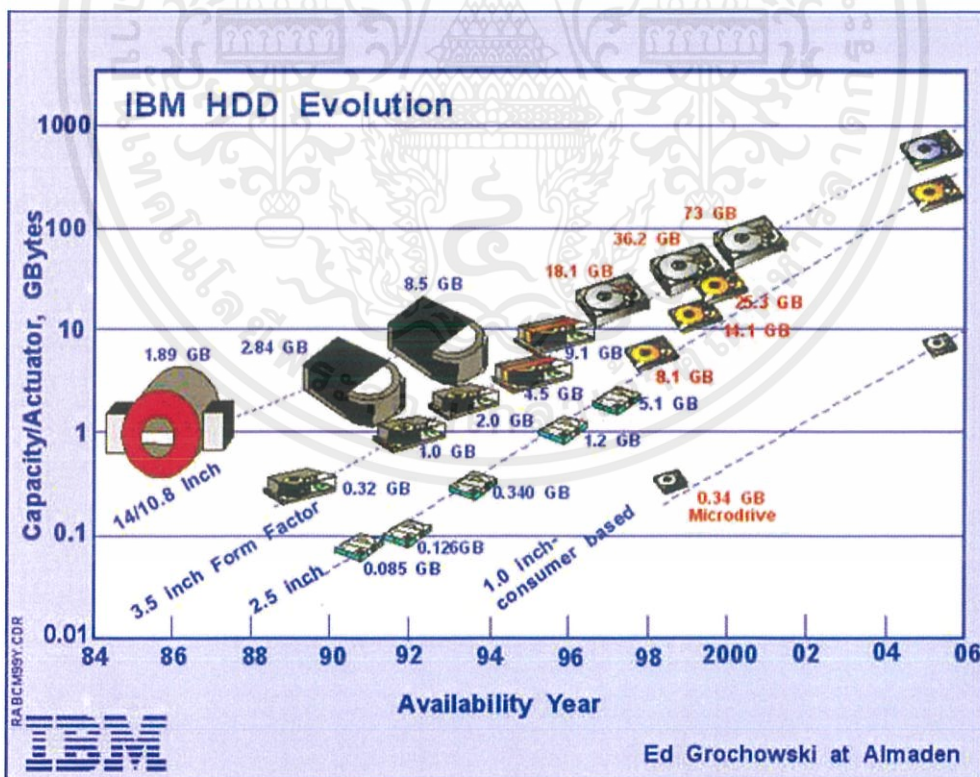
ภาพที่ 1.1 วิวัฒนาการของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่มีความสำคัญ และมีประสิทธิภาพสูงมากที่สุดตัวหนึ่งนั่นก็คือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Harddisk drive) ซึ่งในปัจจุบันสามารถบรรจุข้อมูลได้มากถึง 8 TB [อ้างอิงจากบริษัทซีเกท เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน)] ที่ได้เปิดตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ความจุ 8 TB ตัวแรกของโลก [2] ดังแสดงในภาพที่ 1.2

โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลที่สำคัญตัวหนึ่งนั่นก็คือ เทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล โดยทั่วไปมีเทคนิคที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อยู่ 2 เทคนิค คือ

- 1) การบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวนอน (Longitudinal magnetic recording, LMR) ซึ่งเป็นการบันทึกข้อมูลโดยให้ทิศทางสนามแม่เหล็กมีทิศทางวางตัวตามแนวนอน โดยให้ทิศทางสนามแม่เหล็กในแต่ละบิตมีทิศสวนทางกัน ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้สูงถึง  $100 \text{ Gb/in}^2$
- 2) การบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้ง (Perpendicular magnetic recording, PMR) จะเป็นการบันทึกข้อมูลโดยให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศทางวางตัวตามแนวตั้ง ซึ่งพัฒนามาจากการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวนอน โดยการบันทึกข้อมูลตามแนวตั้งนี้จะสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้มากกว่าการบันทึกตามแนวนอนอย่างมาก สามารถบันทึกได้สูงที่สุดถึง  $345 \text{ Gb/in}^2$



ภาพที่ 1.2 ขนาดของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เล็กลงแต่บรรจุข้อมูลได้สูงขึ้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้จากข้อมูลจะเห็นว่า การใช้เทคนิคการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้ง มีประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูลได้มากกว่าการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวนอนอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการจัดวางโดเมนแม่เหล็กจำนวนมากกว่า โดยบริษัท Toshiba (Japan) เป็นบริษัทแรกที่ใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้งผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกขายในตลาดในช่วงราวปี พ.ศ. 2548 จากนั้นก็มีบริษัทอื่นเปิดตัวผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคโนโลยีในการจัดเก็บข้อมูลแบบการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้งออกมาเรื่อยๆ ซึ่งนับว่าเป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญมากสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทั้งนี้ในปัจจุบันก็ยังคงมีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้งอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากวัสดุที่จะสามารถนำไปใช้การบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้งได้นั้นต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้ คือ จะต้องมีความหนาแน่นของแม่เหล็กที่ขุดเยียมโดยเฉพาะค่าสนามลบล้าง (coercive field) ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงเหลือ (residual magnetic flux density) และค่าสัดส่วนความเป็นสี่เหลี่ยมของวงวนฮิสเทอรีซิส (squareness ratio) นอกจากนี้วัสดุตัวกลางยังต้องมีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงอีกด้วย โดยพบว่าวัสดุที่สอดคล้องกับคุณสมบัติดังกล่าวมีหลายตัว เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\text{Co}$   $\text{CrO}_2$   $\text{FeCo}$  ทั้งนี้วัสดุตัวกลางที่นำมาใช้ร่วมกับการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวตั้งนั้นจะต้องสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางได้ มีเกรนที่มีลักษณะแบบแท่ง (column) และต้องมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (anisotropic) สูงอีกด้วย โดยพบว่าโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ (Co) กับโครเมียม (Cr) นั้นมีสมบัติสอดคล้องกับความต้องการดังกล่าว ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงจะมุ่งความสนใจไปที่การเตรียมอัลลอยของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ด้วยวิธีดั้งเดิมเพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกลางบันทึกข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 2.1) เพื่อศึกษาการประดิษฐ์วัสดุในระบบโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ใช้ทำเป็นตัวกลางในการบันทึกข้อมูล (ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์) ที่มีประสิทธิภาพสูง
- 2.2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบ เฟสที่เกิดขึ้น ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และสมบัติแม่เหล็ก ของวัสดุในระบบโคบอลต์-โครเมียม

### 1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมเม็ดอัลลอยของ โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ใช้เทคนิคการเตรียมด้วยวิธีดั้งเดิม โดยมีสัดส่วนของ โคบอลต์-โครเมียม ที่แตกต่างกันไป จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติแม่เหล็ก สมบัติเชิงกล ลักษณะทางกายภาพและพื้นผิวของวัสดุ พร้อมทั้งหาว่าสัดส่วนองค์ประกอบใดมีสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงที่สุด สุดท้ายจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบและสมบัติที่ได้ โดยแผนการทำวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย ประจำปีภาคเรียนที่ 1

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1				
	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
คุยกับอาจารย์ที่ปรึกษา, กำหนดหัวข้อวิจัย, หาวรรณกรรมที่สนใจ	➔				
ทำการเตรียมอัลลอย Co-Cr ที่สัดส่วนต่างๆ	➔				
ทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแกนเดี่ยว และเทคนิค cold isostatic pressing			➔		
เผาซินเตอร์ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน				➔	
ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ				➔	
ส่งบทที่ 1,2,3 พร้อมפרิเซนต์ รายงานความคืบหน้า					➔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย ประจำปีภาคเรียนที่ 2

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 2				
	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
ตรวจสอบเฟสของเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	➔				
ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาของเม็ดอัลลอย Co-Cr		➔			
ตรวจสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติแม่เหล็กของเม็ดอัลลอย Co-Cr			➔		
วิเคราะห์, วิจารณ์ และสรุปผลการทดลองทั้งหมด				➔	
จัดพิมพ์ รูปเล่ม และนำเสนอผลงานวิจัยต่อคณะกรรมการ					➔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และ อัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)

##### 2.1.1 โคบอลต์ (Cobalt ; Co)

โคบอลต์ (อังกฤษ: Cobalt) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอมเป็น 27 และมีสัญลักษณ์คือ Co โดยโคบอลต์อยู่ในตารางธาตุหมู่ 27 มีลักษณะทั่วไปคือเป็นโลหะที่มีสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 58.9332 กรัม/โมล มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนคือ  $[Ar] 3d^7 4s^2$  โคบอลต์จัดอยู่ในกลุ่มทรานซิชันเมทัล (transition metal) ซึ่งช่วยควบคุมการเผาไหม้ ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ จึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดเนื้อหยาบที่อุณหภูมิสูง และยังช่วยเสริมโครงสร้างทางโมเลกุลให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำ Co ไปผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อน และเหล็กไฮสปีด ทั้งนี้ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็น โคบอลต์ 60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงไม่ควรเติมโคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทั่วไป โดย Co มีสมบัติของอะตอมและสมบัติกายภาพดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

##### ตารางที่ 2.1 สมบัติอะตอมของ Co

สมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	hexagonal
สถานะออกซิเดชัน	2, 3 (amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.88 (Pauling units)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 760.4 (K·J)/mol
	ระดับที่ 2: 1648 (K·J)/mol
	ระดับที่ 3: 3232 (K·J)/mol
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอมที่ได้จากการคำนวณ	152 pm
รัศมีโควาเลนต์	126 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของ Co

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง	8.90 g/cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	7.75 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1768 K , (1495 °C)
จุดเดือด	3200 K , (2927 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	16.06 (K·J)/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	377 (K·J)/mol
ความร้อนจำเพาะ (25 °C)	24.81 J/(mol·K)
ความต้านทานไฟฟ้า (20 °C)	62.4 nΩ·m
การนำความร้อน (300 K)	100 W/(m·K)
การขยายตัวจากความร้อน (25 °C)	13.0 μm/(m·K)
โมดูลัสของยังก์	209 GPa
โมดูลัสของแรงเฉือน	75 GPa
โมดูลัสของแรงบีบอัด	180 GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.31
ความแข็งโมห์ส	5.0
ความแข็งวิกเกอร์ส	1043 MPa
ความแข็งบริเนล	700 MPa

### 2.1.2 โครเมียม (Chromium; Cr)

โครเมียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งมีสีเงิน เป็นธาตุลำดับที่ 24 มีสัญลักษณ์เป็น Cr หลอมละลายที่ 1875 °ซ มักใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษเพื่อใช้ทำเครื่องมือช่าง และอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยโครเมียม ธาตุนี้ค้นพบโดย Vauquelin ในปี ค.ศ. 1797 ในแร่ crocoite (PbCrO<sub>4</sub>) จากไซบีเรีย ซึ่งเป็นแร่ตะกั่วมีสีแดง ในปีต่อมา Vauquelin สามารถสกัดโครเมียมจาก Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยดีดิวซ์ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยผงถ่าน ในปี ค.ศ. 1893 Moissan ได้สกัด Cr ได้เช่นกัน โดยรีดิวซ์ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยถ่านหินในเตาไฟฟ้า จากนั้นในปี ค.ศ. 1898 Goldschmidt สกัด Cr อีสรูปราศจากคาร์บอนเจือปน โดยนำ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มารีดิวซ์ด้วย Al แล้วจึงเริ่มมีการใช้แร่ของโครเมียมใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมประมาณปี ค.ศ. 1800 โดยนำผลิตเคมีภัณฑ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหนังสัตว์และสี ชื่อของธาตุนี้มาจากภาษากรีก "Chromos" แปลว่าสี เนื่องจากสารประกอบของโครเมียมหลายชนิดมีสี โดย Cr มีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติของอะตอม แสดงดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของ Cr

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง	7.15 g/cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	6.3 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	2180 K (1907 °C)
จุดเดือด	2944 K (2671 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	21.0 (K·J)/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	339.5 (K·J)/mol
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 23.35 J/(mol·K)
การนำความร้อน	(300 K) 93.9 W/(m·K)
การขยายตัวจากความร้อน	(25 °C) 4.9 μm/(m·K)
โมดูลัสของยังก์	279 GPa
โมดูลัสของแรงเฉือน	115 GPa
โมดูลัสของแรงบีบอัด	160 GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.21
ความแข็งโมห์ส	8.5
ความแข็งวิกเกอร์ส	1060 MPa
ความแข็งบริเนล	1120 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 สมบัติอะตอมของ Cr

สมบัติอะตอมของ Cr	
โครงสร้างผลึก	cubic body centered
สถานะออกซิเดชัน	6, 3, 2 (ออกไซด์เป็นกรดแก่)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.66 (Pauling units)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 652.9 (K·J)/mol
	ระดับที่ 2: 1590.6 (K·J)/mol
	ระดับที่ 3: 2987 (K·J)/mol
รัศมีอะตอม	140 pm
รัศมีอะตอมจากการคำนวณ	166 pm
รัศมีโควาเลนต์	127 pm

### 2.1.3 โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)

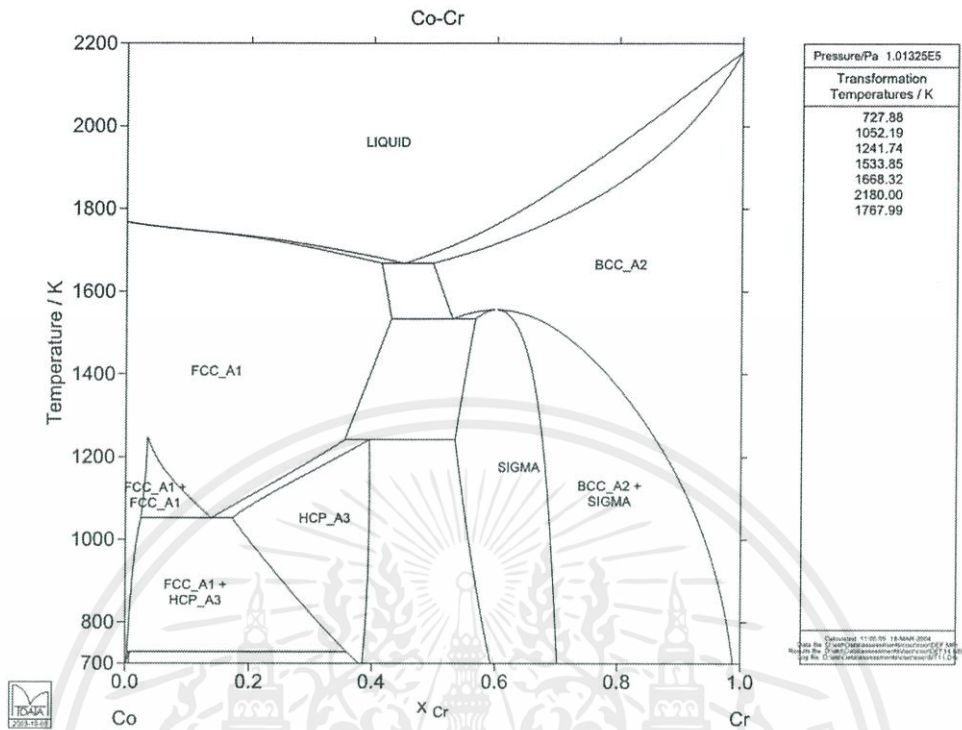
โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) หรือ โคบอลต์-โครมเป็นโลหะผสมระหว่างโคบอลต์กับโครเมียม ซึ่งอัลลอยที่เกิดขึ้นมีค่าความแข็งแรงจำเพาะที่สูงนิยมนำไปใช้งานเป็นใบพัดเครื่องยนต์ อวัยวะเทียมในช่องปากและอวัยวะเทียมแบบฝังใน โดยอัลลอย Co-Cr นี้ถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในราวต้นปี ค.ศ. 1900 โดย Elwood Haynes ด้วยการหลอมโลหะโคบอลต์เข้ากับโลหะโครเมียมซึ่งในการค้นพบครั้งแรกนี้ได้มีธาตุอื่นปนอยู่ด้วย เช่น ทังสแตนและโมลิบดีนัม โดยอัลลอยที่เกิดขึ้นนี้สามารถต้านทานต่อการออกซิเดชัน และการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งยังไม่มีวิเวกที่จะเกิดสนิมเลยแม้จะนำไปต้มในกรดไนตริก จากสมบัติพิเศษดังกล่าวนี้ทำให้อัลลอย Co-Cr ถูกนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์มากมายในหลายด้าน โดยเฉพาะการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการเสียดสีสูง เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ในยานยนต์และยานอวกาศ อุปกรณ์ตัดและใบมีด โดยมีชื่อทางการค้าของอัลลอย Co-Cr ที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานในกลุ่มนี้ว่า Stellite™ จากนั้นในราวศตวรรษที่ 20 อัลลอย Co-Cr นี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยนิยมนำไปใช้เป็นอวัยวะเทียมแบบฝังใน ในส่วนของข้อต่อ สะโพก เข่า และสะพานฟัน เนื่องจากอัลลอยนี้นอกจากจะมีสมบัติความทนทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมแล้วยังมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีอีกด้วย นอกจากนี้อัลลอยกลุ่มนี้ยังสามารถแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้ด้วยจึงมีการนำไปใช้งานเป็นตัวกลางบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยเช่นกัน ทั้งนี้จะเห็นว่าอัลลอย Co-Cr นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกลุ่ม ซึ่งก็เป็นผลมาจากการมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยสมบัติของอัลลอยจะสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างและสัดส่วนองค์ประกอบอย่างมาก ซึ่งแผนผังเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอัลลอย Co-Cr ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.1 โดยจากรูปจะเห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกันจะแสดงโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันโดยที่โคบอลต์มีปริมาณ 60-75 % จะแสดงเฟส  $\alpha$  ซึ่งมีความเปราะและแตกง่าย ในขณะที่เฟส  $\gamma$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (face centered cubic) จะมีความแข็งแรงและความเหนียวมากกว่าและเมื่อโครเมียมมีปริมาณมากๆ จะทำให้อัลลอยมีโครงสร้างผลึกเป็น BCC (Body Centered cubic) ซึ่งเฟสที่ต่างกันจะมีสมบัติเชิงกายภาพ ซึ่งได้แก่ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลว รวมไปถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลทำให้มีการเลือกไปประยุกต์ใช้งานต่างกัันนั่นเอง อาทิเช่นอัลลอยที่มีโคบอลต์ในปริมาณมาก (Co-rich) มักจะเกิดเป็นโลหะประเภทซูเปอร์อัลลอยซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานในกลุ่มไบพัตเครื่องยนต์ ส่วนอัลลอยที่มีโคบอลต์ราว 60 % มักนำไปใช้งานเกี่ยวกับร่างกายเป็นอวัยวะเทียม สะพานฟัน หัวเข่า และข้อเทียม เนื่องจากมีสมบัติโดดเด่นด้านความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกาย แต่หากมีโคบอลต์ราว 17 % มักนิยมนำไปใช้เป็นสารเคลือบผิว (coating) สำหรับใช้งานภายใต้ภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้สัดส่วนองค์ประกอบจะสำคัญแล้วลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของเฟสก็สำคัญเช่นกัน ดังเช่นการนำไปประยุกต์เป็นตัวกลางบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (Magnetic recording media) ที่จะต้องอยู่ในรูปของฟิล์มบาง (Thin film) และมีโดเมนเรียงตัวอยู่ในแนวตั้งเพื่อให้อ่านข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลตามแนวตั้ง (Perpendicular recording technology) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุดในปัจจุบันซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลได้จำนวนมากและมีประสิทธิภาพสูง

#### 2.1.4 การนำ Co-Cr ไปใช้งานทางฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

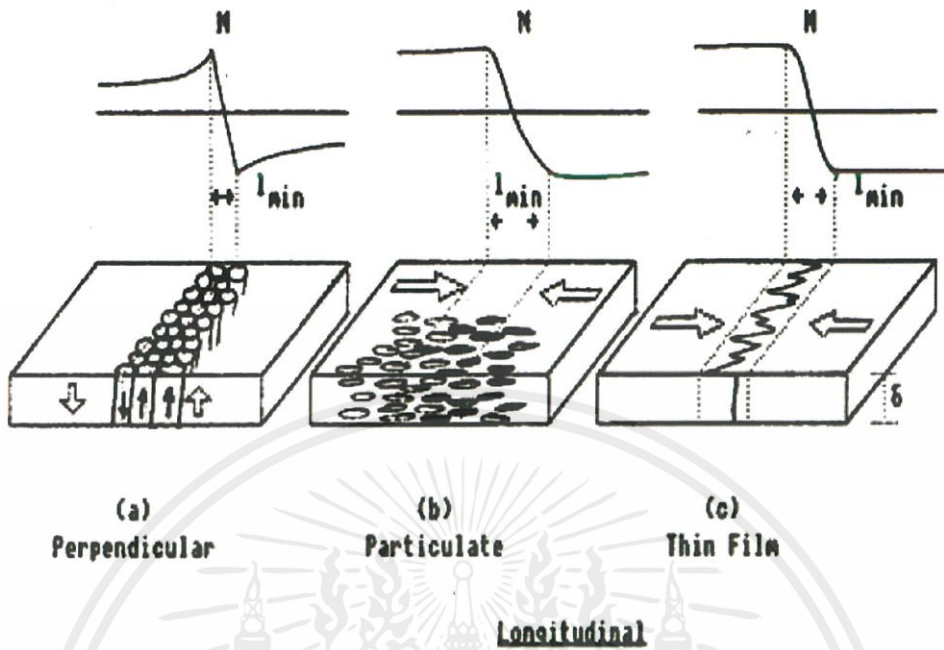
ในการประยุกต์วัสดุโคบอลต์และองค์ประกอบของโคบอลต์เป็นตัวกลางบันทึกข้อมูลแม่เหล็กนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามรูปร่างของวัสดุคือ (1) อยู่ในรูปของออกไซด์และอนุภาคโลหะ และ (2) เป็นฟิล์มโลหะ ซึ่งอัลลอย Co-Cr ที่นำมาประยุกต์ใช้งานในกลุ่มนี้นั้นมักจะอยู่ในรูปของฟิล์มบางที่เคลือบลงบนแผ่นฐานพลาสติกหรืออลูมิเนียม เนื่องจากสามารถควบคุมให้เกิดลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง (Columnar) ได้ง่ายโดยโครงสร้างแบบนี้จะเอื้ออำนวยต่อเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลที่ทันสมัย ที่สามารถบรรจุข้อมูลได้สูง ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างแบบแนวตั้ง (Perpendicular) จะสามารถบรรจุข้อมูลแม่เหล็กได้มากกว่าแบบอื่น และภาพที่ 2.3 เป็นรูปแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุข้อมูลด้วยเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวอน (Longitudinal recording) กับเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวตั้ง (Perpendicular recording)



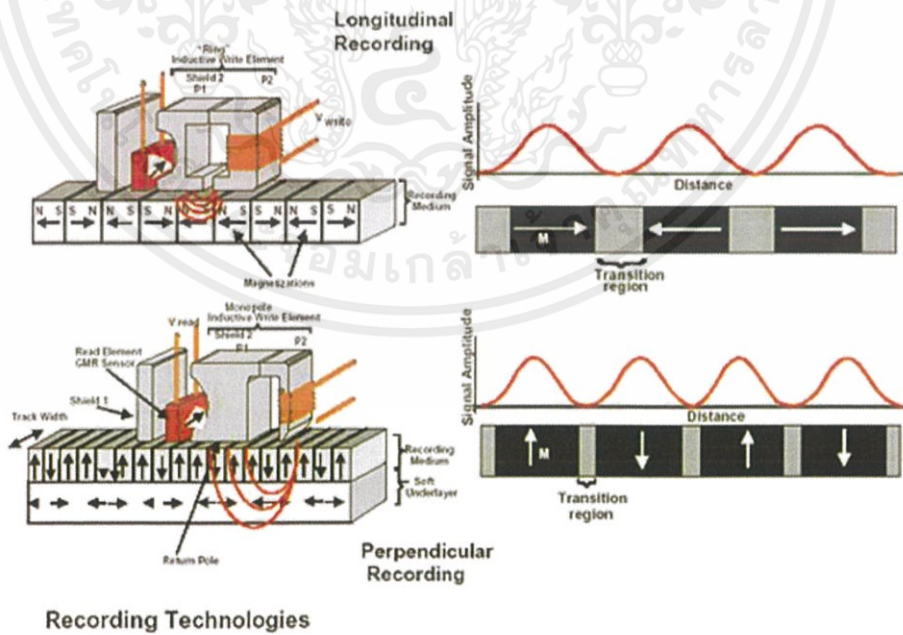
ภาพที่ 2.1 แผนผังเฟสของอัลลอย Co-Cr [4]

ทั้งนี้การเตรียมฟิล์มอัลลอย Co-Cr ให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นไปตามที่ต้องการนั้นสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องควบคุม ซึ่งในปัจจุบันก็มีนักวิจัยให้ความสนใจในส่วนนี้อย่างต่อเนื่อง ดังเช่นงานวิจัยของ Betancourt-Cantera และคณะ [6] ที่ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของสารในระบบ  $Co_{100-x}Cr_x$  เมื่อ  $0 < x < 100$ ,  $\Delta x=10$  ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคโลหะผสมเชิงกล โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างโคบอลต์และโครเมียม พร้อมทั้งการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น และสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเปลี่ยนไป โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อโลหะผสมผ่านการบดย่อยเป็นเวลานานกว่า 7 ชั่วโมงแล้วจะเกิดโครงสร้างของ Co-hcp Co-fcc และ Cr-bcc ขึ้น และที่สัดส่วน  $Co_{90}Cr_{10}$  จะแสดงค่าโพลาริเซชันอิมิตัวสูงสุด ( $J_s$ ) และมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้น โดยค่าสนามลบล้าง ( $H_c$ ) มีค่าสูงสุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $Co_{40}Cr_{60}$  ซึ่งภาพที่ 2.4 และ 2.5 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสแม่เหล็กของสารในระบบ  $Co_{100-x}Cr_x$  และค่าโพลาริเซชันอิมิตัวสูงสุด ( $J_s$ ) กับค่าสนามลบล้าง ( $H_c$ ) ที่สัมพันธ์กับปริมาณของโครเมียมตามลำดับ

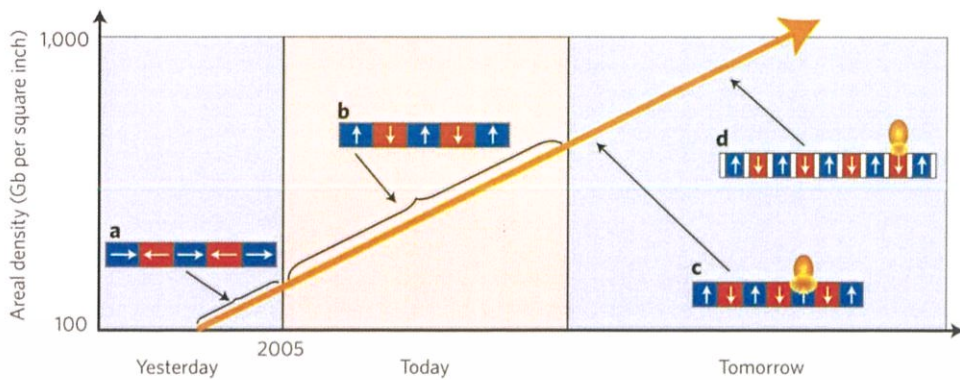
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



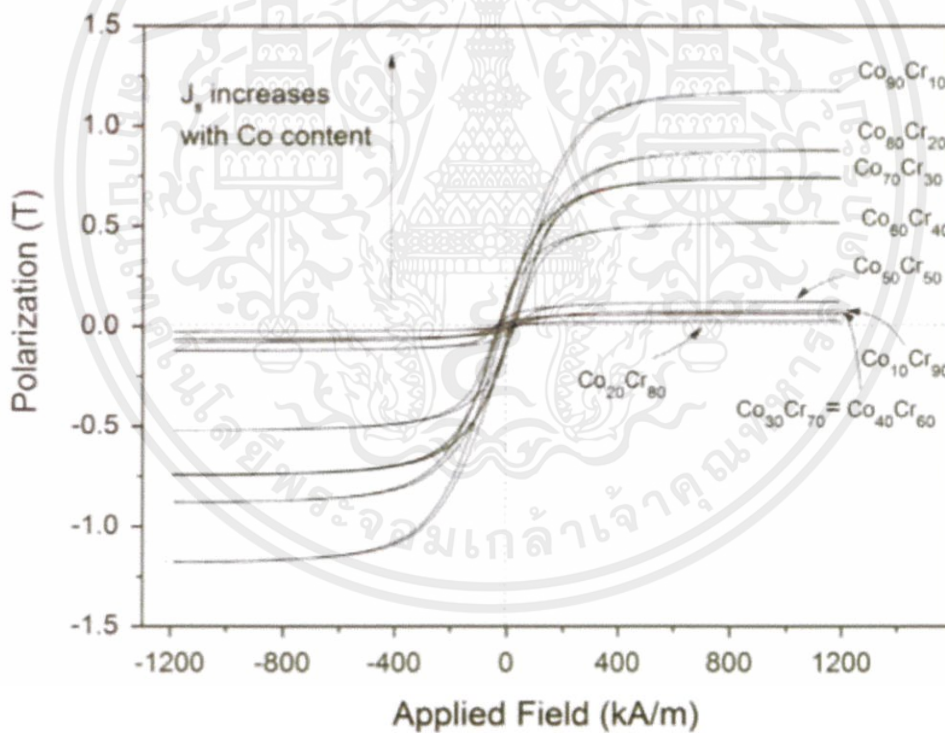
ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้น [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

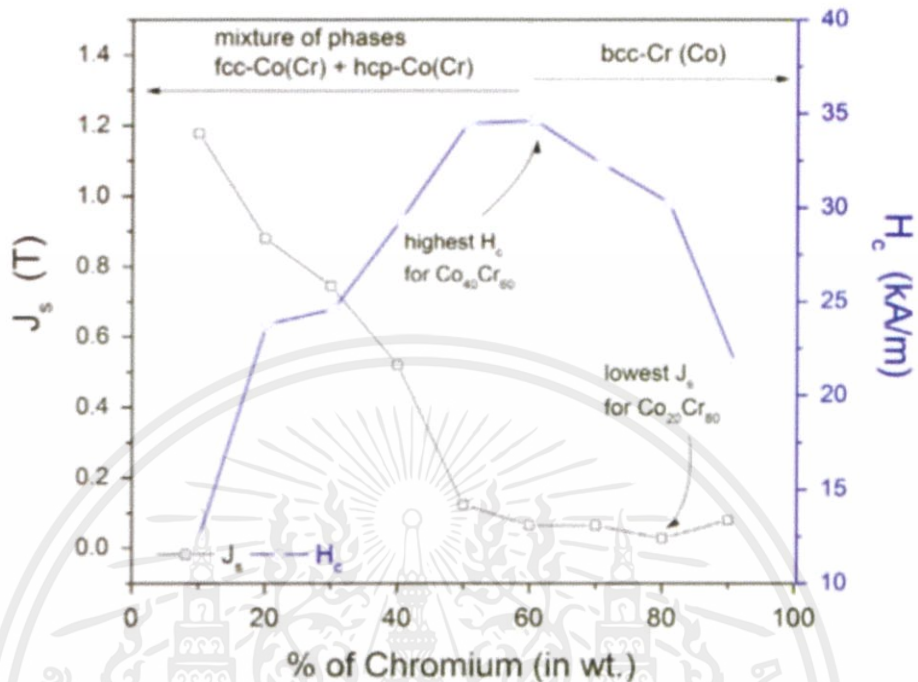


ภาพที่ 2.3 การเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุข้อมูลด้วยเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวนอน (Longitudinal recording) กับเทคนิคการบรรจุข้อมูลทางแม่เหล็กแนวตั้ง (Perpendicular recording)



ภาพที่ 2.4 วรณฮีสเทอรีซิสแม่เหล็กของสารในระบบ  $\text{Co}_{100-x}\text{Cr}_x$  เมื่อ  $0 < x < 100$ ,  $\Delta x=10$ [6]

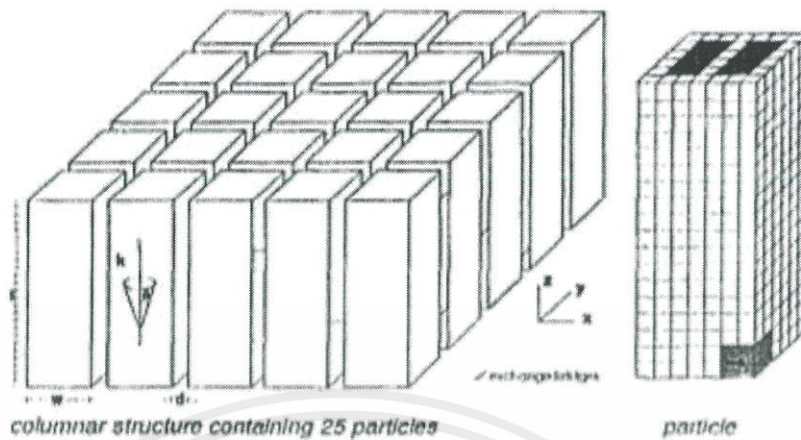
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวสูงสุด ( $J_s$ ) กับค่าสนามลบล้าง ( $H_c$ ) ที่สัมพันธ์กับปริมาณของโครเมียมของสารในระบบ  $Co_{100-x}Cr_x$  เมื่อ  $0 < x < 100$ ,  $\Delta x=10$  [6]

จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าสัดส่วนองค์ประกอบที่ให้ค่าทางแม่เหล็กสูงจะอยู่ในสัดส่วนที่มีปริมาณของโคบอลต์มาก (Co-rich) จึงทำให้งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงแม่เหล็กของอัลลอย Co-Cr มุ่งความสนใจไปที่สัดส่วนองค์ประกอบบริเวณนี้เป็นส่วนมากดังเช่นงานวิจัยของ G.W Qin และคณะ [7] ที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิสูงในบริเวณสัดส่วนที่มีปริมาณโคบอลต์มาก (Co-rich) ของระบบไบนารี Co-Cr ที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสเฟอร์โรแมกเนติก  $\alpha_f$  กับเฟสพาราแมกเนติก  $\alpha_p$  ของ FCC  $\alpha$ -Co ซึ่งพบว่าพฤติกรรมทางแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลง และงานวิจัยของ J.C. Lodder [8] ที่ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคเชิงแม่เหล็กของตัวกลาง Co-Cr เมื่อโครเมียมมีปริมาณมากกว่า 26 % ให้เหมาะสมกับเทคนิคการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Perpendicular recording) โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองของโครงสร้างที่ควรจะเป็นสำหรับการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งสำหรับ Co-Cr ที่ถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบาง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยในรูปแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของฟิล์มอัลลอย Co-Cr นั้นควรที่จะมีรูปทรงเป็นแบบแท่ง (column) โดยพบว่าโครงสร้างแบบนี้สามารถบรรจุข้อมูลแม่เหล็กได้ความหนาแน่นสูงถึง 12 Gbit/in<sup>2</sup> ในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาามีผลอย่างมากต่อความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

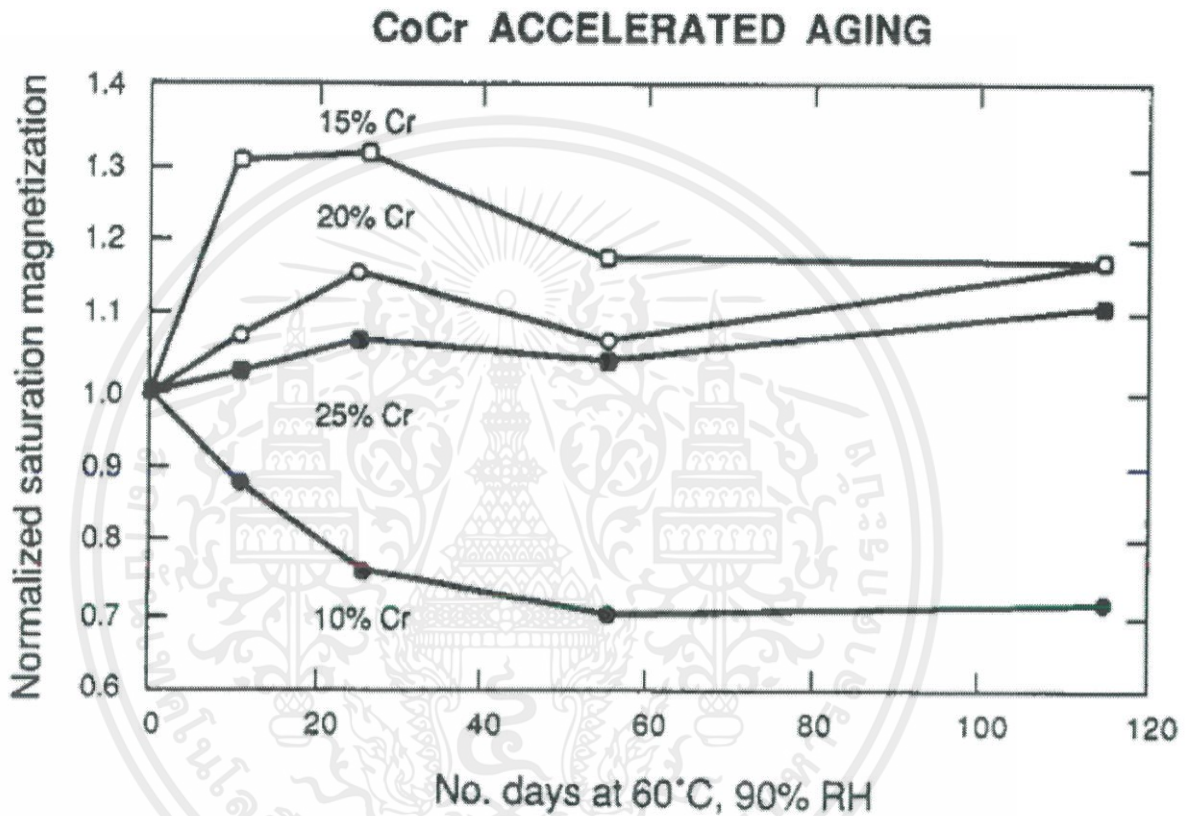


ภาพที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างจุลภาคแบบแท่งของ Co-Cr สำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง [8]

จากตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่านอกจากสัดส่วนองค์ประกอบของสารในระบบ Co-Cr จะมีผลอย่างมากต่อสมบัติแม่เหล็กแล้ว เฟสที่เกิดขึ้นและลักษณะโครงสร้างจุลภาคก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งให้ความสนใจศึกษาปัจจัยในระหว่างกระบวนการเตรียม ที่มีผลต่อเฟสที่เกิดขึ้น ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และสมบัติที่ได้ อย่างไรก็ตามบรรยากาศในการนำไปใช้งาน ก็มีผลต่อสมบัติที่อัลลอย Co-Cr แสดงออกมาเช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ G.L. McINTIRE และคณะ [9] ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนและสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบาง Co-Cr ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้บรรยากาศเชิงไฟฟ้าและเชิงเคมี โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนองค์ประกอบมีผลอย่างมาก ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น และสมบัติแม่เหล็กที่แสดงออกมา ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนโตเซชันอิ่มตัวของฟิล์ม Co-Cr ที่มีปริมาณโครเมียมต่าง ๆ กับ ระยะเวลาที่ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90 % ที่อุณหภูมิ 60 °ซ

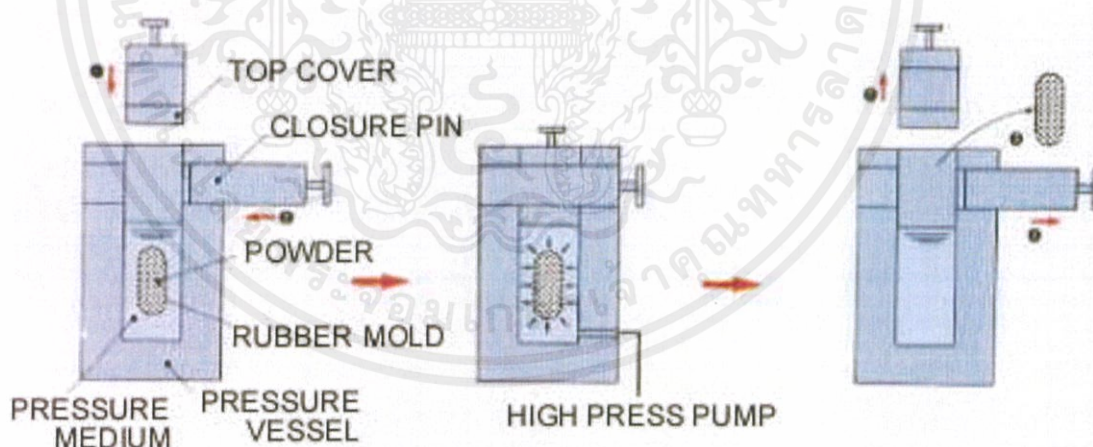


ภาพที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนโตเซชันอิ่มตัวของฟิล์ม Co-Cr ที่มีปริมาณโครเมียมต่าง ๆ กับระยะเวลาที่ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90 % ที่อุณหภูมิ 60 °ซ [9]

## 2.2 เทคนิคการเตรียมสาร

### 2.2.1 เทคนิคการอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง (cold isostatic pressing)

การขึ้นรูปโดยวิธี Isostatic pressing วิธีนี้เป็นการอัดเนื้อสารด้วยแรงอัดที่เท่ากันทุกทิศทาง หมายความว่าผลิตภัณฑ์ทุกส่วนจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมากซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่โค้งงอและไม่แตกเมื่อเผา วิธีการนี้สามารถใช้ความดันสูง ๆ ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการแตกเนื่องจากความดัน การขึ้นรูปโดยวิธีนี้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปเผาเพื่อให้อนุภาคผนึกตัวกัน (sinter) จะได้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความแน่นมากกว่าการขึ้นรูปโดยวิธีอื่น ๆ เพราะว่าการขึ้นรูปโดยวิธีนี้จะมีความเครียดเกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์สูงมาก และความเครียดนี้จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเร่งให้เนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการผนึกตัวกันได้ดี และเร็วขึ้น การขึ้นรูปวิธีนี้ใช้กับการผลิตวัสดุทนไฟชนิดพิเศษผลิตหัวเทียน ในกรณีการขึ้นรูปด้วยวิธี Isostatic pressing ถ้าเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องจะเรียกว่า Cold isostatic pressing (CIP) โดยมีหลักการทำงานคือ นำอนุภาคผง (powder) ไปบรรจุในแม่พิมพ์ยืดหยุ่นที่ปิดสนิทและกันน้ำได้แล้วนำไปไว้ในห้องอัดความดัน ซึ่งห้องอัดความดันนี้จะอัดความดันผ่านตัวกลางซึ่งเป็นของเหลว (fluid) โดยส่วนมากที่ใช้กันได้แก่ น้ำหรือน้ำมัน และควบคุมให้มีความดันอยู่ระหว่าง 21-690 MPa เมื่อมีการอัดความดันเสร็จ และนำชิ้นงานออกจากห้องอัดความดันแล้วชิ้นส่วนจะถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ดังแสดงเป็นแผนภาพได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของเทคนิคการอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง cold isostatic pressing

[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของ CIP คือ

2.2.1.1 ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีการจำกัดขอบเขตของชิ้นงาน (รูปร่างหลากหลาย)

2.2.1.2 การทำให้เนื้อชิ้นงานรวมกันมีการใช้รูปแบบการกดที่เหมือน ๆ กัน ซึ่งจะนำไปสู่ความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ หรือทุกส่วนจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก

2.2.1.3 โดยทั่ว ๆ ไปเครื่องมือจะมีราคาอยู่ในระดับปานกลางคือไม่แพงมากนัก

2.2.1.4 ใช้เวลาสั้นในการผลิต

ข้อเสียของ CIP คือ

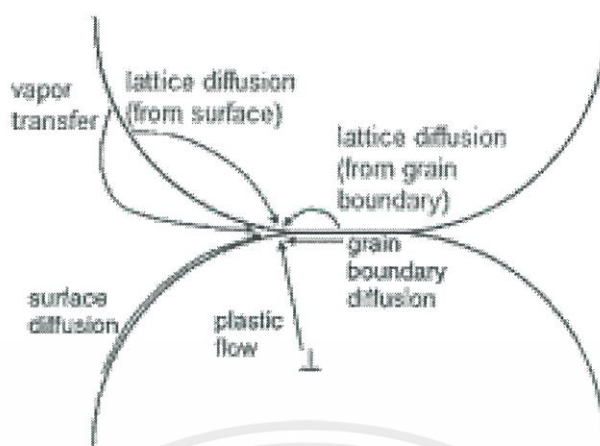
2.2.1.1 การควบคุมรูปร่างหรือรูปร่างอยู่ในระดับที่แย่

2.2.1.2 โดยเฉพาะชิ้นงานตัวอย่างง่าย ๆ จะมีความเป็นไปได้ในการผลิตสูง

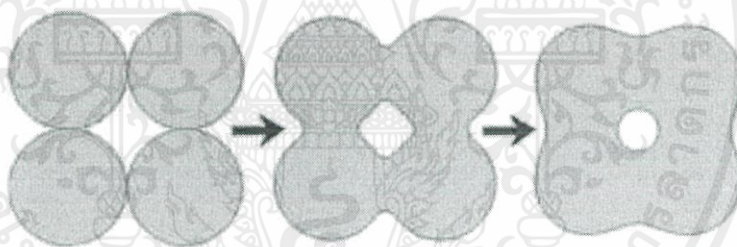
2.2.2 กระบวนการซินเตอร์ในบรรยากาศ

กระบวนการซินเตอร์ คือกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้วัสดุที่แต่เดิมมีลักษณะเป็นผงอัด (powder compact) เกิดการแน่นตัวกลายเป็นชิ้นงานที่มีความแข็งแรง โดยกระบวนการซินเตอร์สามารถจำแนกได้หลายประเภทโดยในที่นี้จะกล่าวถึงการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (Solid-state sintering) สำหรับการซินเตอร์ประเภทนี้เป็นการซินเตอร์วัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก (polycrystalline materials) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-80 % ของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น ๆ ในกระบวนการนี้จะไม่ทำให้ผงของสารเกิดการหลอมรวมกัน แต่จะเกิดการเชื่อมเข้าหากันที่บริเวณผิวหน้าของแต่ละอนุภาค ส่งผลให้รูพรุนภายในลดลงหรือปล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยกลไกสำหรับการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.9 โดยในขณะที่ผงอัดได้รับความร้อนสูงกลไกในการยึดตัวนี้จะเริ่มจากการแพร่ซิมที่พื้นผิว (surface diffusion) ระหว่างอนุภาคที่สัมผัสกันก่อให้เกิดเป็นรอยต่อระหว่างอนุภาค การแพร่ซิมของแลตทิซ (lattice diffusion) เกิดเป็นคอคอด (neck) ตรงบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค ในระหว่างกระบวนการนี้จะไม่ส่งผลให้ความแน่นตัวภายในชิ้นงานเพิ่มขึ้น (nondensifying mechanism) ต่อมาคอคอดจะเริ่มขยายใหญ่ขึ้นทำให้บริเวณส่วนกลางที่อนุภาคทั้ง 3 สัมผัสกันจะเกิดเป็นรูกลม จะมีการแพร่ซิมของขอบเกรน (grain boundary diffusion) และการแพร่ซิมของแลตทิซจากบริเวณขอบเกรนไปยังรูพรุนกลไกในช่วงนี้ส่งผลให้ความหนาแน่นในเนื้อชิ้นงานเพิ่มขึ้น (densifying mechanism) โดยภาพกลไกการแน่นตัวแสดงไว้ในภาพที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



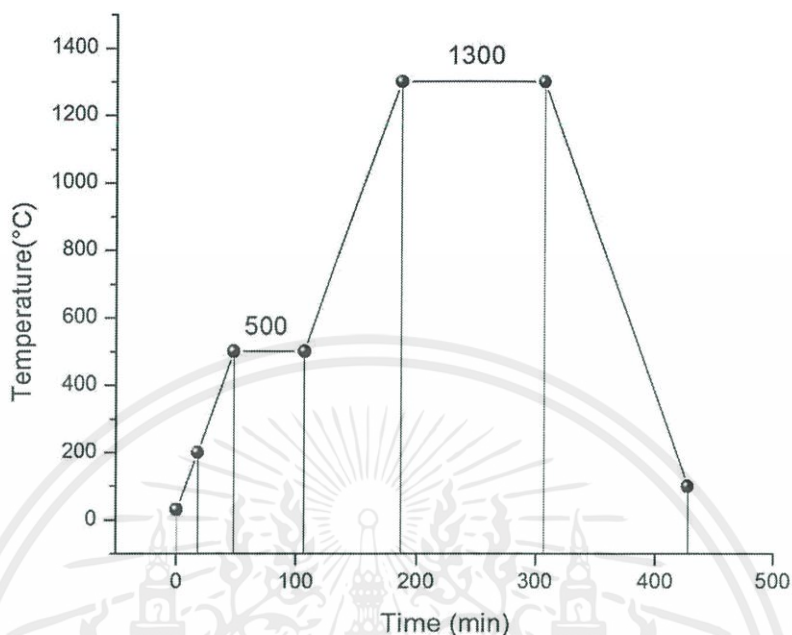
ภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงกลไกการซินเตอร์



ภาพที่ 2.10 แผนภาพการเกิดคอคอด (necking)

ในกระบวนการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งนี้จะมีขั้นตอนในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.11 ขั้นแรกเป็นการเผาไล่ตัวประสาน (binder) ให้ระเหยออกไปที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิไม่เกิน 2 °ซ/นาที เพื่อหลีกเลี่ยงการบวมหรือร้าวเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป จากนั้นจะเป็นการทำการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิต่าง ๆ แล้วแต่ชนิดของสาร จากนั้นเผาแช่ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ โดนขั้นตอนนี้จะ เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเผาซินเตอร์ และสุดท้ายจะเป็นการลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องเป็นการสิ้นสุดกระบวนการซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาซินเตอร์

## 2.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.3.1 เทคนิคตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

ในการวิเคราะห์วัสดุต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณและชนิดของสารประกอบแบบผลึก หรือแม้กระทั่งศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ นิยมใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เนื่องจากผลึกในวัสดุแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ (unit cell) ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกแต่ละชนิดต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในวัสดุ ความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้อาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ 2.1

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

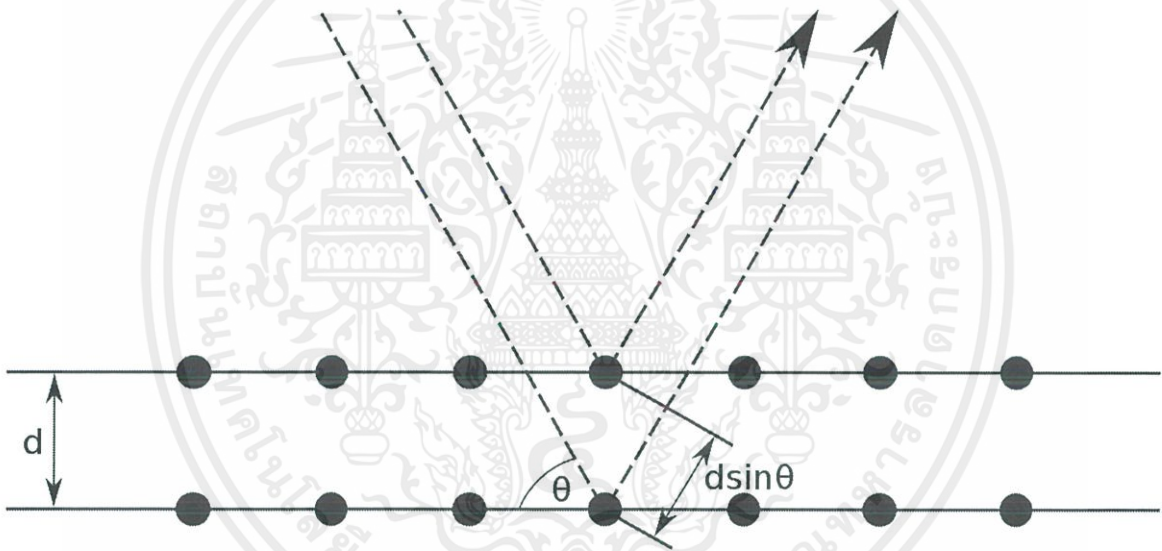
โดยที่  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

$\theta$  คือ มุมตกกระทบ

$n$  คือ เลขจำนวนเต็ม

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบบดงแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผนภาพแสดงการตกกระทบบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกก์ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

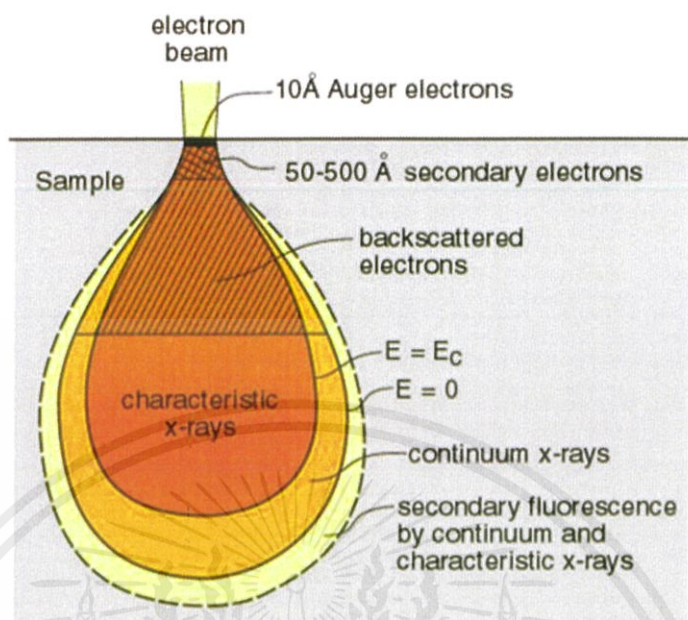
### 2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) มีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนที่จะเป็นแสงเหมือนกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป โดยลำอิเล็กตรอนจะเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนท์ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็กซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงานเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบดังแสดงในภาพที่ 2.13 เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน ดังนี้

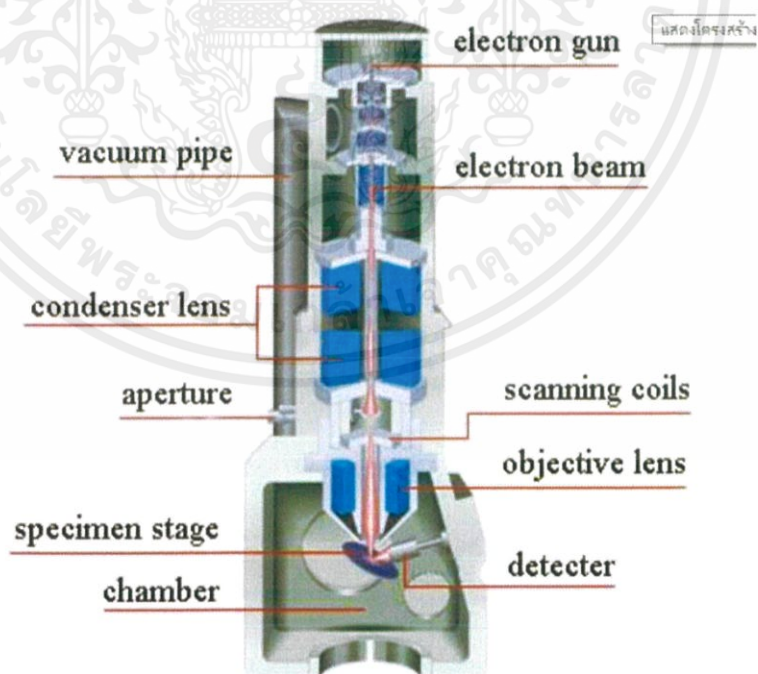
2.3.2.1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (valance band) ซึ่งใช้พลังงานไม่สูงเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนนี้จะเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.3.2.2) อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (back-scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามาชนกับชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนนี้จะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานบางส่วนแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

2.3.2.3) รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่สูงเกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้ามาชนชิ้นงานทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K,L,M, . . .) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรแล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา โดยสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (energy dispersive X-ray; EDX) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 2.13 แผนภาพแสดงอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานในระดับพลังงานต่าง ๆ [13]



ภาพที่ 2.14 แผนภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

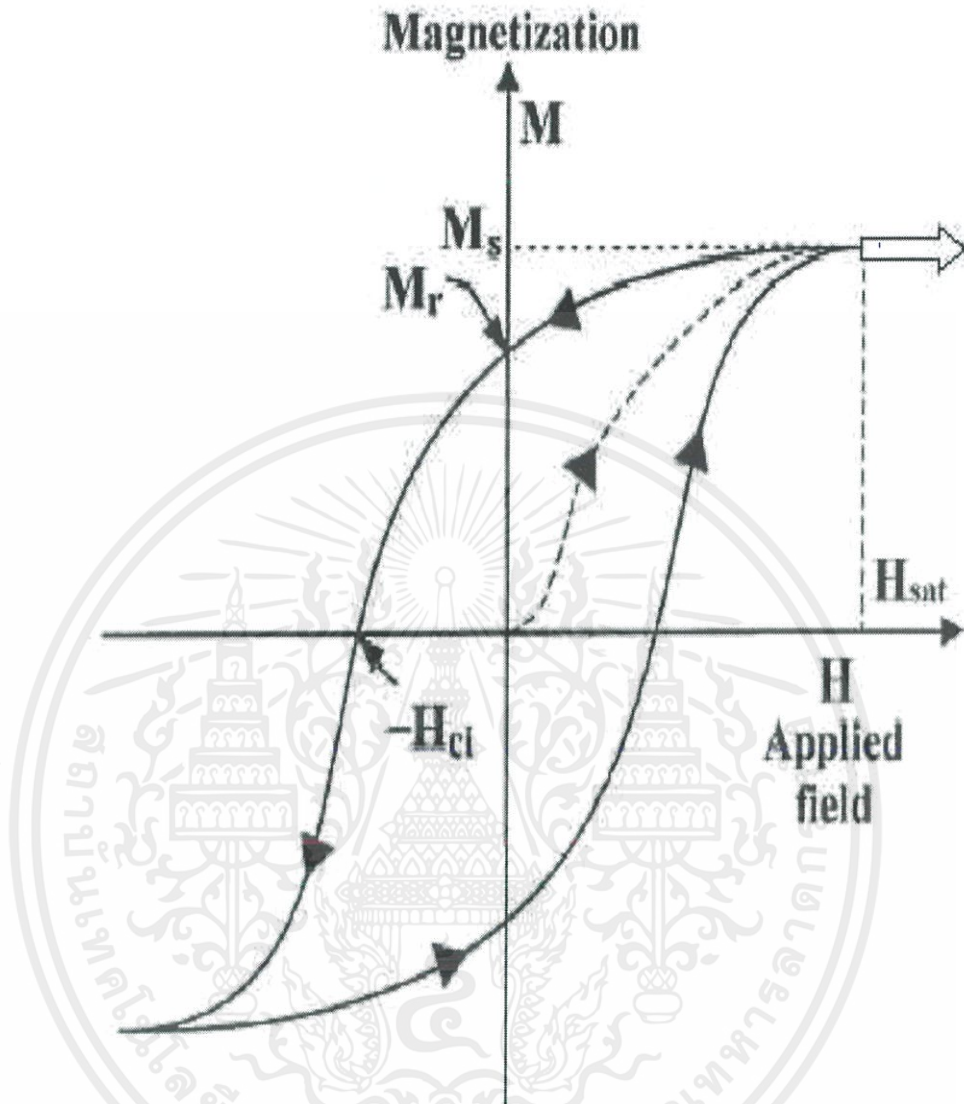
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 เทคนิคการตรวจสอบสมบัติแม่เหล็ก (vibrating sample magnetometer; VSM)

เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กของสารด้วยหลักสารสั่น (vibrating sample magnetometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็ก โดยมีหลักการทำงานคือสารตัวอย่างที่ต้องการวัดสมบัติแม่เหล็กนั้นจะถูกนำไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก (H) ที่มีค่าเท่ากับ 10 kOe ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ขั้วทางแม่เหล็กจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นสารตัวอย่างจะถูกทำให้สั่นและเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ สารตัวอย่าง จากนั้นตัวตรวจจับสัญญาณจะทำการตรวจจับสัญญาณแล้วแปลงสัญญาณแสดงผลออกมาในรูปเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก (magnetic hysteresis loop) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็ก (magnetic field; H) กับแมกนีไทเซชัน (magnetization; M) โดยการเกิดวงวนฮิสเทอรีซิสมีหลักการดังนี้

เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่วัสดุแม่เหล็กที่ขั้วภายในมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (unmagnetized) ทำให้แมกนีไทเซชัน (magnetization; M) ค่อย ๆ เกิดการจัดเรียงตัวของขั้วแม่เหล็กไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวจะเรียกค่านี้อีกว่า ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturate magnetization;  $M_s$ ) จากนั้นทำการลดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $H = 0$ ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือไม่มีสนามแม่เหล็กนั่นเอง แต่ยังคงมีค่าแมกนีไทเซชันหลงเหลืออยู่โดยค่านี้อีกจะเรียกว่า ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (remanence magnetization;  $M_r$ ) จากนั้นทำการป้อนสนามแม่เหล็กแก่วัสดุอีกครั้งในทิศทางตรงกันข้ามกับในครั้งแรกทำให้ค่าแมกนีไทเซชันเท่ากับศูนย์ ( $M = 0$ ) โดยค่าของสนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไทเซชันเท่ากับศูนย์จะเรียกว่า ค่าสนามลบล้าง (coercivity;  $H_c$ ) เมื่อป้อนค่าสนามในทิศทางเดิมต่อไปเรื่อยๆ จะก่อให้เกิดการอิ่มตัวอีกครั้งในทิศทางตรงข้ามกับตอนแรก และเมื่อลดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $H = 0$ ) ก็จะมีค่าแมกนีไทเซชันคงค้างอีกครั้ง (remanence magnetization;  $M_r$ ) จนเกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่ภายในจะแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเป็นการสูญเสียทางฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 วงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็กและค่าต่าง ๆ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 เทคนิคการวัดความแข็งแบบบริเนลล์

การวัดความแข็งบริเนลล์ (Brinell hardness test) คือการวัดความแข็งของวัสดุจากรอยบวมที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรที่ทำด้วยเหล็กกล้าหรือทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์ แล้วนำมาวัดด้วยเครื่องวัดที่ได้มาตรฐาน ผลลัพธ์ของความแข็งที่มีหน่วยเป็นบริเนลเท่ากับน้ำหนักที่กดเป็นกิโลกรัม หารด้วยเนื้อที่ที่เกิดรอยถูกกดวัดเป็นตารางมิลลิเมตร ชื่อหน่วยวัดบริเนลตั้งตามชื่อของนักโลหวิทยา (Metallurgist) ชาวสวีเดน ชื่อโยฮัน บริเนล สามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสมการที่ 2.2 ดังนี้

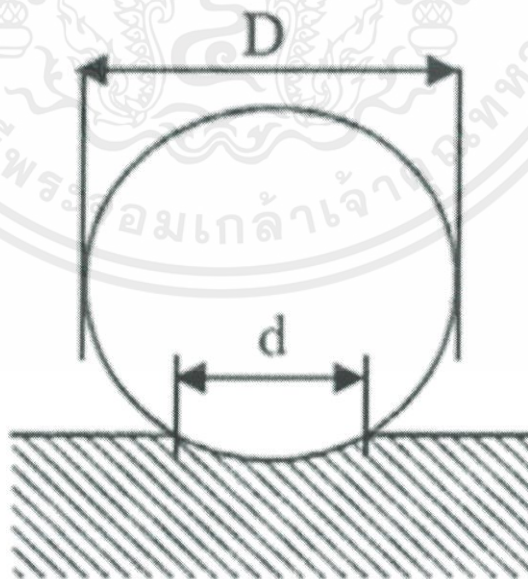
$$BH = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

โดยที่ BH คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell ( $\text{kg/mm}^2$ )

P คือ แรงกด (kg)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)



ภาพที่ 2.16 ภาพหัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ กระบวนการเตรียมผง กระบวนการเตรียมเม็ด กระบวนการเตรียมฟิล์มของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่สัดส่วนต่าง ๆ รวมไปถึงการตรวจสอบสมบัติกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น องค์ประกอบทางเคมี สัณฐานวิทยา และโครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็ง และสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

- 3.1.1 ผงโคบอลต์
- 3.1.2 ผงโครเมียม
- 3.1.3 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol)
- 3.1.4 ก๊าซอาร์กอน (Ar)
- 3.1.5 ผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )

#### 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 เครื่องชั่งสารแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.2.2 กระดาษฟอยล์
- 3.2.3 ครกหยกสำหรับบดสาร (mortar)
- 3.2.4 เครื่องอัดแบบแกนเดียวด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic uniaxial pressing)
- 3.2.5 เครื่องอัดด้วยแรงทุกทิศทาง (Cold Isostatic Pressing)
- 3.2.6 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร
- 3.2.7 ถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร (alumina crucible)
- 3.2.8 ถังซีปล็อกสำหรับเก็บชิ้นงาน
- 3.2.9 ซ้อนตักสาร
- 3.2.10 นาฬิกาจับเวลา
- 3.2.11 คีมคีบ (forceps)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.12 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
- 3.2.13 ตู้ดูดความชื้น
- 3.2.14 ปีกเกอร์
- 3.2.15 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)
- 3.2.16 ตู้อบสารอุณหภูมิ 80 °C
- 3.2.17 กระจกทราย
- 3.2.18 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer)
- 3.2.19 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)
- 3.2.20 เครื่องตรวจสอบสมบัติแม่เหล็ก (vibrating sample magnetometer)
- 3.2.21 เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Tester)

### 3.3 กระบวนการเตรียมผง

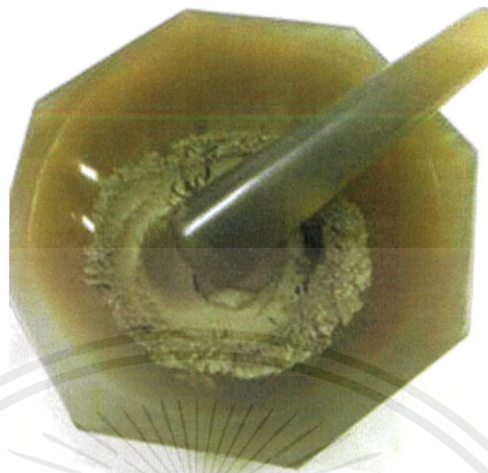
#### 3.3.1 โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr)

ในการเตรียมเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เริ่มจากการนำผงโคบอลต์ (Co) และผงโครเมียม (Cr) มาผสมกันตามสมการ (3.1) ดังนี้



เมื่อ  $x = 0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90$  และ  $100$  % โดยน้ำหนัก

โดยเริ่มจากนำสารมาชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดสูงตามสัดส่วนที่คำนวณได้เทลงในครกหยก จากนั้นทำการบดผสมสารให้เข้ากันเป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นนำผง Co-Cr ที่ผ่านการบดผสมใส่ไว้ในถุงซิปล็อค เมื่อทำการบดย่อยและผสมสารครบทุกอัตราส่วนแล้วจึงนำสารที่ได้เก็บใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอก



ภาพที่ 3.1 ครกหยกบดสาร



ภาพที่ 3.2 ตู้ควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดอัลลอย

#### 3.4.1 เทคนิคการอัดขึ้นรูปเม็ดอัลลอย

นำผงโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ผ่านการบดผสมตามหัวข้อที่ 3.3 มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดอัลลอยด้วยเครื่องอัดแกนเดียว (uniaxial pressing) ระบบไฮดรอลิกดังภาพที่ 3.3 โดยจะนำผง Co-Cr มาผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะประสาน จากนั้นนำผงผสมที่ได้ใส่ในแม่พิมพ์อัดสารที่ทำจากโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ด้วยแรงอัด 1500 Kg เป็นเวลานาน 90 วินาที ก็จะได้เม็ดอัลลอย Co-Cr ดังภาพที่ 3.5

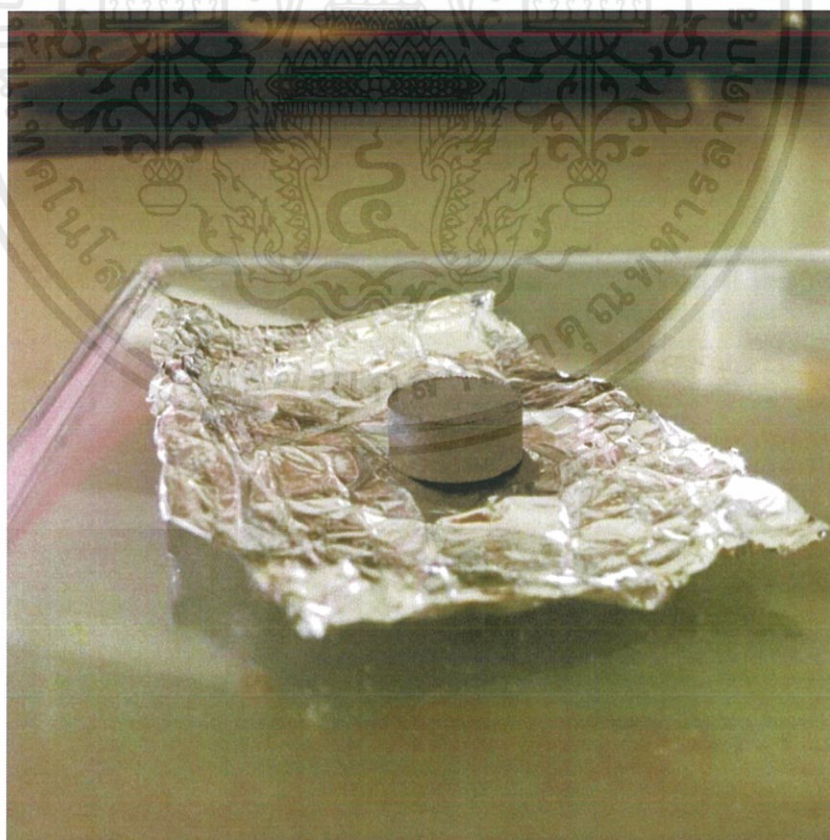


ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดแกนเดียว (hydraulic uniaxial pressing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



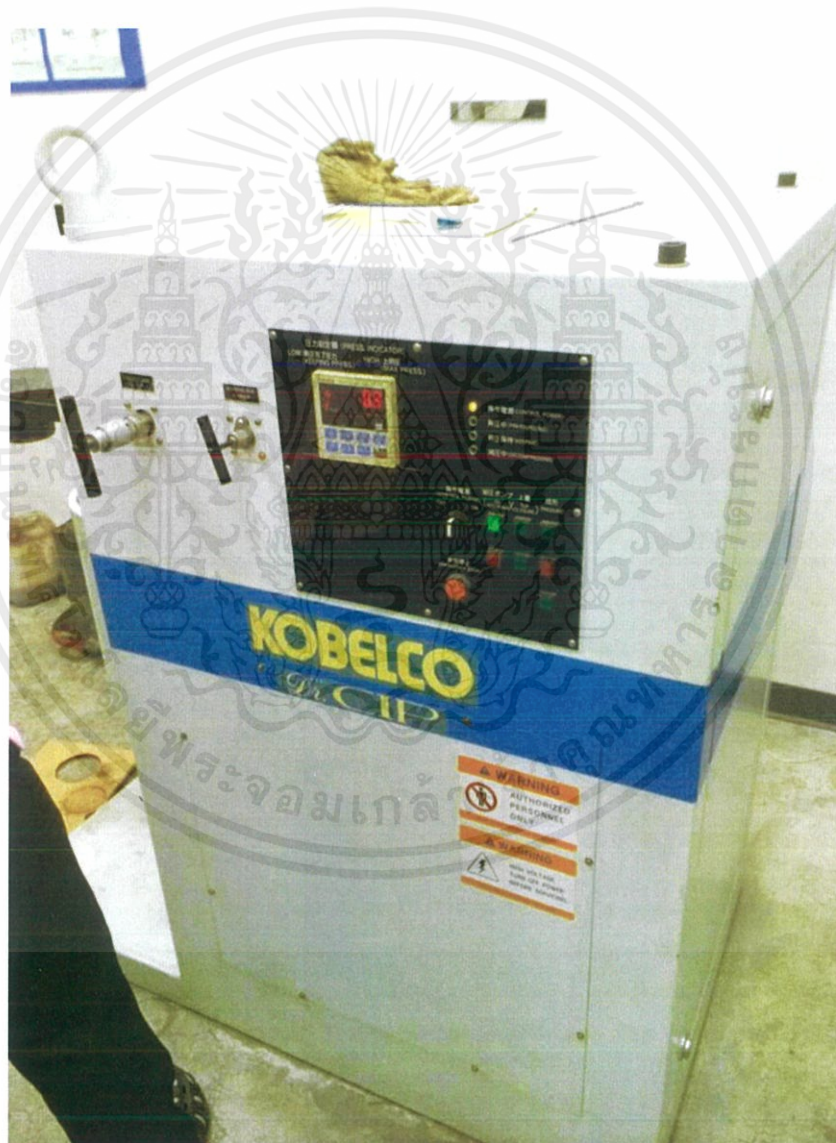
ภาพที่ 3.4 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน



ภาพที่ 3.5 เม็ดอัลลอย Co-Cr

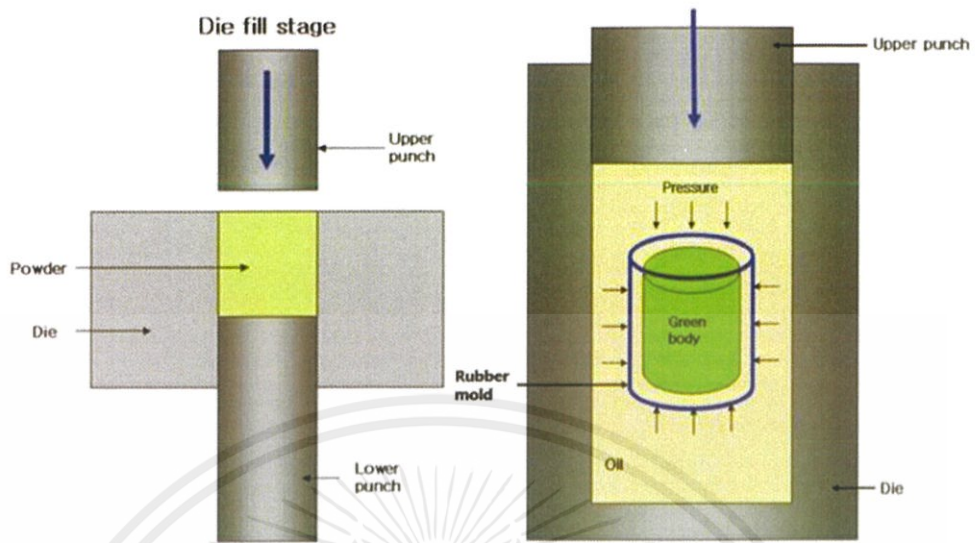
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่ผ่านการอัดด้วยเครื่องอัดแกนเดี่ยวมาทำการอัดขึ้นรูปซ้ำด้วยเครื่องอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทางที่อุณหภูมิห้อง (cold isostatic pressing) ดังแสดงในภาพที่ 3.6 โดยมีวิธีการเตรียมชิ้นงานดังนี้ นำเม็ดอัลลอยที่ต้องการอัดมาใส่ไว้ในภาชนะยึดหยุดที่ปิดสนิท โดยในที่นี้จะใช้ถุงยางอนามัยเพื่อป้องกันของเหลวจากเครื่องอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง ซึมเข้ามาที่เม็ดอัลลอย จากนั้นทำการดูดอากาศออกจากถุงยางอนามัย รัดปากถุงยางอนามัยให้แน่นเพื่อป้องกันอากาศเข้าไป แล้วจึงทำการอัดด้วยแรง 250 MPa เป็นเวลานาน 5 นาที ดังแสดงตามภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.6 เครื่องอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง (CIP)

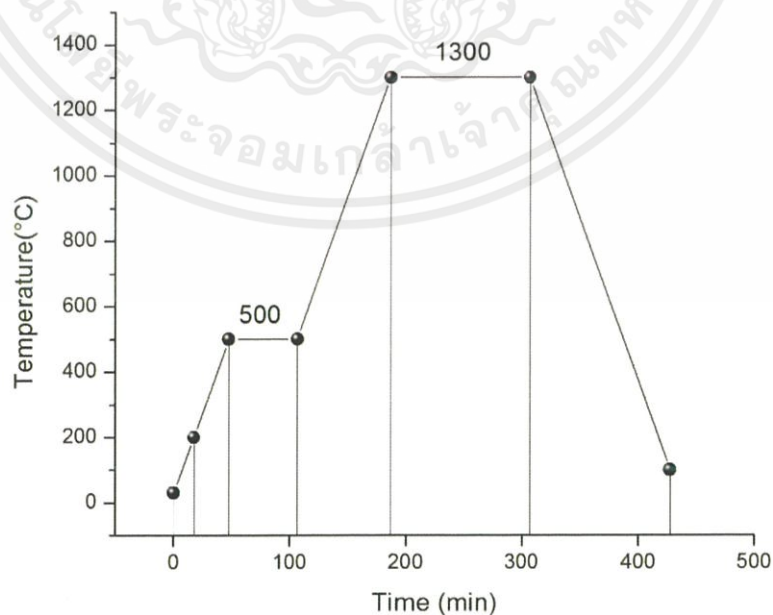
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 แผนภาพจำลองการอัดด้วยแรงทุกทิศทุกทาง

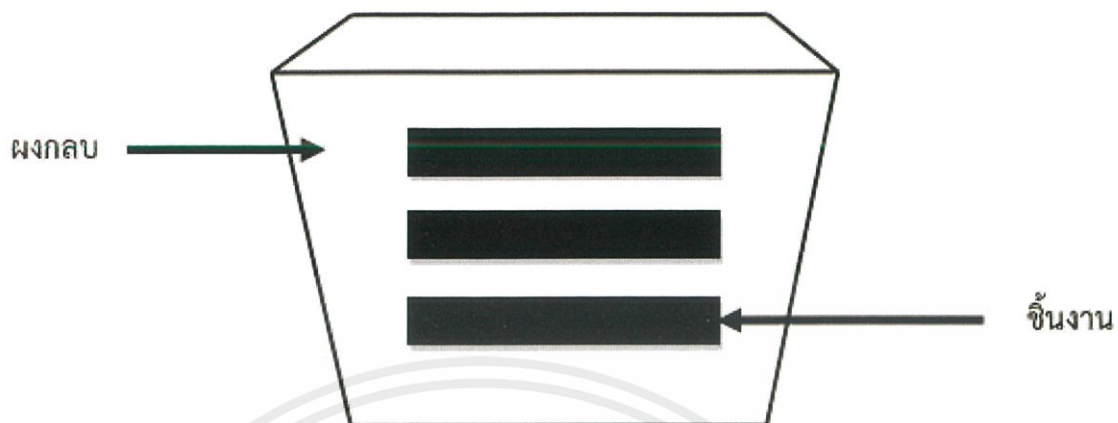
### 3.4.2 การเผาซินเตอร์ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน

นำเม็ดอัลลอยที่ผ่านกระบวนการอัดทั้ง 2 ขั้นตอน มาใส่ในครุชีเบลแล้วทำการกลบฝังด้วยผงอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เพื่อช่วยให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งครุชีเบล จากนั้นจึงทำการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน (Ar) เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของเม็ดอัลลอย Co-Cr โดยขั้นตอนและอุณหภูมิของการเผาเป็นไปตามภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 การจัดเรียงชิ้นงานในครุซีเบิลสำหรับการชินเตอร์



ภาพที่ 3.10 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสารพร้อมระบบควบคุมบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ

#### 3.5.1 ความหนาแน่น

นำเม็ดอัลลอย Co-Cr ทั้ง 11 ตัวอย่างมาตรวจวัดความหนาแน่นหลังการเผาแน่นโดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes method) เริ่มจากนำเม็ดอัลลอย Co-Cr มาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วปล่อยให้เม็ดอัลลอย Co-Cr เย็นตัวลงเองในน้ำที่ทำการต้ม จากนั้นจึงนำเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่ผ่านการต้มและปล่อยให้เย็นตัวลงมาชั่งในน้ำ ( $W_3$ ) เมื่อชั่งในน้ำเสร็จให้นำเอาเม็ดมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินออกด้วยกระดาษทิชชู แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งอีกครั้ง น้ำหนักที่ได้จะเรียกว่าน้ำหนักจากการชั่งเปียกหรือชั่งหมาด ( $W_2$ ) เมื่อผ่านการชั่งสองขั้นตอนนี้แล้วให้นำเม็ดอัลลอย Co-Cr ไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 80 °C อบให้แห้งสนิทแล้วนำเม็ดอัลลอย Co-Cr มาชั่ง โดยน้ำหนักที่ได้จะเรียกว่าน้ำหนักจากการชั่งแห้ง ( $W_1$ ) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการที่ 3.2

$$\rho_c = \left( \frac{W_1}{W_3 - W_2} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\rho_c$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\rho_{H_2O}$  คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการทดลอง (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศขณะแห้ง (กรัม)

$W_2$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

$W_3$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศขณะเปียก (กรัม)

### 3.5.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัว

การหาค่าการหดตัวของเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการซินเตอร์นั้น สามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดอัลลอย Co-Cr ก่อนและหลังการซินเตอร์ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานด้วยสมการที่ 3.3 ดังนี้

$$\%shrinkage = \left( \frac{d_1 - d_2}{d_1} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่  $d_1$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอัลลอยก่อนการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)

$d_2$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอัลลอยหลังการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)

### 3.6 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X Ray Diffraction)

การตรวจสอบเฟสของเม็ดอัลลอย Co-Cr สามารถทำได้โดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.11 โดยเริ่มจากนำชิ้นงานเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่เตรียมได้ไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง XRD จากนั้นจึงเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง ( $\text{CuK}\alpha$ ) ที่ให้รังสีเอกซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 Å ออกมาด้วยระดับประมาณ  $0.02^\circ$ /นาที โดยกฎของแบรกก์เป็นไปตามสมการที่ 3.4 ดังนี้

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

โดยที่  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

$\theta$  คือ มุมตกกระทบ

$n$  คือ เลขจำนวนเต็ม

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

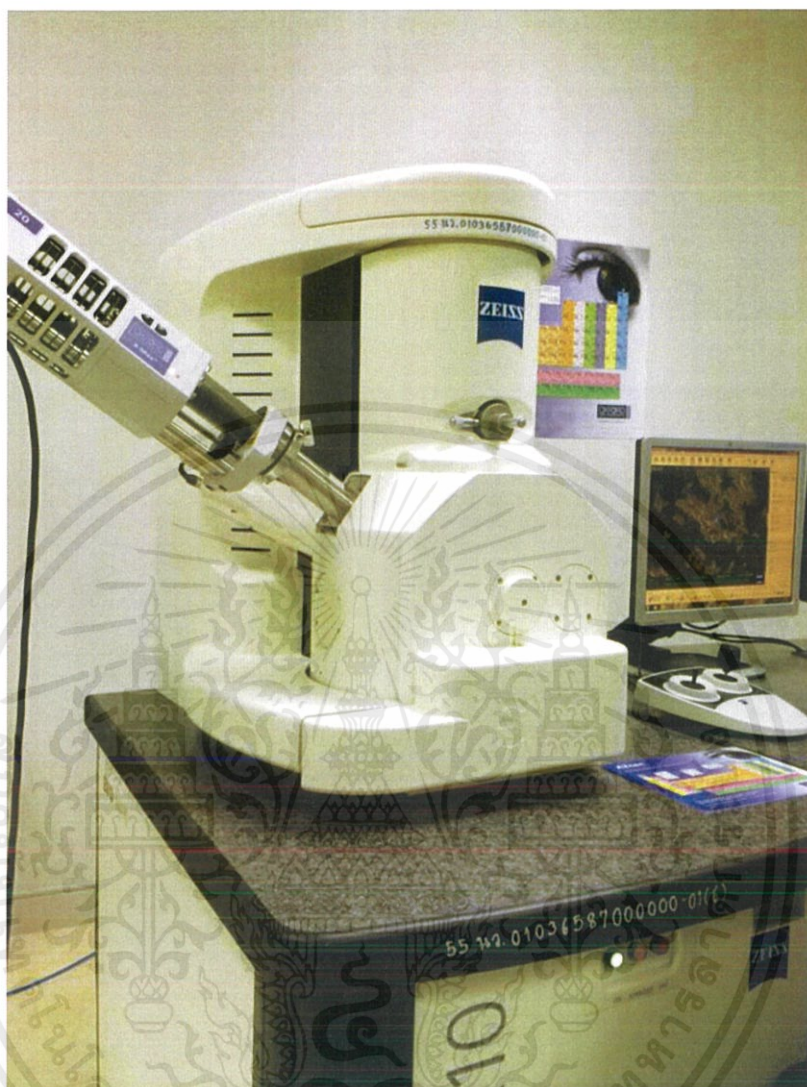


ภาพที่ 3.11 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

### 3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่ผ่านกระบวนการขึ้นเตอร้ทั้งหมดมาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.12 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติแม่เหล็กของเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่เตรียมได้ โดยเริ่มจากการนำเม็ดโลหะอัลลอย Co-Cr แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบไปติดบนแท่นทองเหลือง (stub) ด้วยเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### 3.8 การตรวจสอบค่าความแข็งด้วยเทคนิคการกดแบบบริเนลล์ (Brinell microhardness tester)

นำเม็ดอัลลอย Co-Cr ที่ผ่านกระบวนการขึ้นเตอร์ทั้งหมดมาทำการตรวจสอบวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (brinell Hardness Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3.13 โดยเริ่มจากนำเม็ดอัลลอยแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาขัดผิวหน้าให้เรียบโดยใช้กระดาษทราย เพื่อง่ายต่อการเห็นรอยกด จากนั้นทำการกดชิ้นงานที่ต้องการวัดค่าความแข็งซึ่งในที่นี้ได้ใช้หัวกดเป็นลูกบอลเหล็กขนาด 10 มิลลิเมตร โดยทำการกดค้างไว้ 15 วินาที วัดขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้นแล้วจึงคำนวณค่าความแข็งที่ได้จากรอยกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



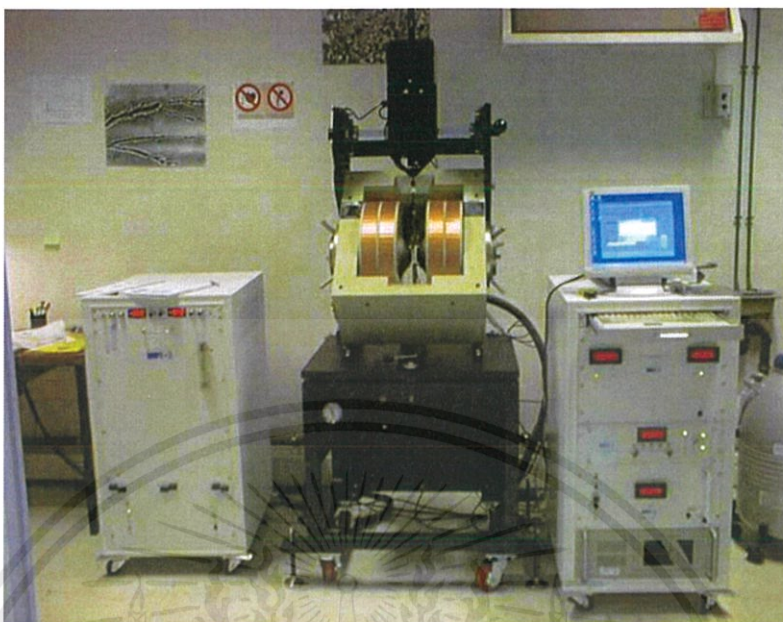
ภาพที่ 3.13 เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Tester)

### 3.9 การตรวจสอบสมบัติทางแม่เหล็ก

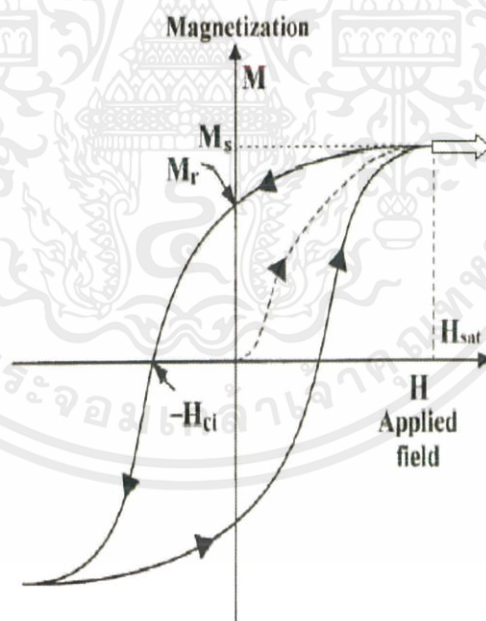
#### 3.9.1 Vibrating Sample Magnetometer (vibrating sample magnetometer ; VSM)

นำเม็ดโลหะ Co-Cr ที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์ทั้งหมดมาตรวจสอบสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กของสารด้วยหลักการสั่น (VSM) ดังแสดงในภาพที่ 3.14 เพื่อหาว่าเม็ดอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบใดมีสมบัติแม่เหล็กที่สูงที่สุด โดยเครื่องมือนี้มีหลักการทํางานคือ สารตัวอย่างที่ต้องการวัดสมบัติแม่เหล็กนั้นจะถูกนำไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก (H) เพื่อให้ขั้วทางแม่เหล็กจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นสารตัวอย่างจะถูกทำให้สั่นและเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ สารตัวอย่าง จากนั้นตัวตรวจจับสัญญาณจะทำการตรวจจับสัญญาณแล้วแปลงสัญญาณแสดงผลออกมาในรูปของวงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก (magnetic hysteresis loop) ดังแสดงในภาพที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.14 เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็กของสารด้วยหลักการสั่น (VSM)



ภาพที่ 3.15 วงวนฮิสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก (magnetic hysteresis loop)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ตามสูตรดังนี้  $Co_{(100-x)}Cr_{(x)}$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการเตรียมอัลลอยแบบดั้งเดิม โดยผลทดลองจะกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพซึ่งก็คือ ความหนาแน่น และการหดตัวหลังเผา นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น ลักษณะโครงสร้างจุลภาคสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ความแข็งแรงแบบบรินเนล และสมบัติทางแม่เหล็ก จากนั้นจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบ โดยรายละเอียดของผลการทดลองได้อภิปรายไว้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพ

##### 4.1.1 ค่าความหนาแน่นภายหลังการเผา

หลังจากทำการขึ้นเตอร์เม็ดอัลลอยในระบบ  $Co_{(100-x)}Cr_{(x)}$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว จากนั้นนำเม็ดอัลลอยที่ผ่านกระบวนการขึ้นเตอร์มาหาความหนาแน่นโดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.3 โดยค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ของเม็ดอัลลอย  $Co_{(100-x)}Cr_{(x)}$

ค่า $x$	ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ ( $g/cm^3$ )
0	8.28
10	5.27
20	5.94
30	6.14
40	5.39
50	5.49
60	6.02
70	6.31
80	5.7
90	5.33
100	5.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density , %) ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์} = 100 - \left( \frac{\text{ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี} - \text{ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้}}{\text{ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

โดยค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ของเม็ดอัลลอย  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$

ค่า x	ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
0	93.05
10	60.45
20	69.49
30	73.33
40	65.82
50	68.52
60	76.77
70	81.35
80	76.08
90	72.94
100	73.47

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดอัลลอยที่สัดส่วน  $x = 0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) มีค่าเยอะที่สุดโดยมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์อยู่ที่ 93.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีสัดส่วนของโครเมียมเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงตามสัดส่วนโครเมียมที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรูพรุนในระหว่างกระบวนการซินเตอร์ อีกทั้งค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโคบอลต์มีค่าเท่ากับ  $8.9 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมากกว่าโครเมียม โดยค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโครเมียมจะอยู่ที่  $7.14 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นเมื่อเม็ดอัลลอยมีสัดส่วนของโครเมียมเป็นองค์ประกอบจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นลดลงนั่นเองเป็นไปตามกฎการผสม (Rule of Mixture) ของวัสดุผสม ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้มีความกว้างของข้อมูลค่อนข้างมาก ซึ่งคาดว่านอกจากจะเป็นผลจากรูพรุนภายในดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังอาจเป็นเพราะมีข้อมูลที่วัดจากชิ้นงานจำนวนน้อยเกินไปเพียง 1 ชิ้นงานต่อ 1 สัดส่วนองค์ประกอบเท่านั้น จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ที่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัวภายหลังการเผา

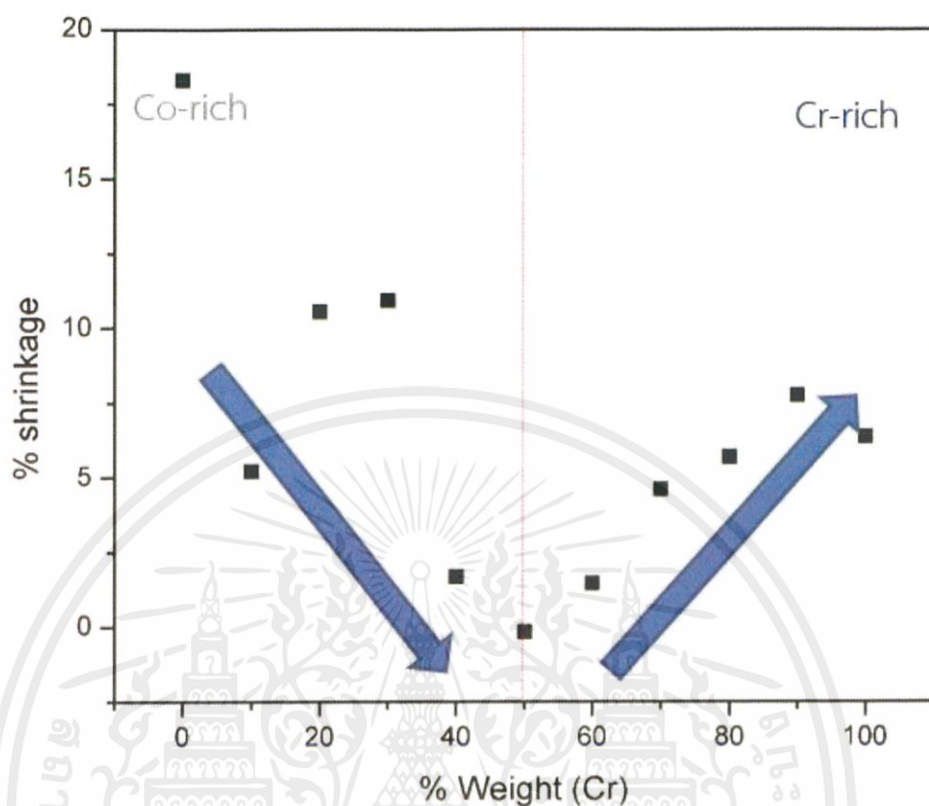
หลังจากทำการเผาซินเตอร์เม็ดอัลลอย Co-Cr ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ  $1300^\circ\text{C}$  เป็นเวลา  $120$  นาที ด้วยอัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิเป็น  $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$  แล้วจึงนำเม็ดอัลลอยที่ได้มาหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวตามสมการที่ (3.1) โดยผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอย Co-Cr ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ค่า x	เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอย Co-Cr
0	18.30
10	5.23
20	10.53
30	10.92
40	1.69
50	-0.15
60	1.46
70	4.61
80	5.69
90	7.76
100	6.38

และเมื่อนำไปพลอตเป็นกราฟพบว่าได้ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าสามารถพิจารณาได้เป็น 2 บริเวณคือ บริเวณที่มีปริมาณโคบอลต์มากกว่า (Co-rich) และบริเวณที่มีโครเมียมมากกว่า (Cr-rich) โดยเริ่มจากที่  $x=0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) เม็ดอัลลอยมีการหดตัวเยอะที่สุด และลดลงเรื่อย ๆ เมื่อค่า  $x$  เพิ่มขึ้น นั่นคือมีปริมาณโครเมียมเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง จนกระทั่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุด  $x=50$  และเมื่อปริมาณโครเมียมมากกว่า  $50$  ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่  $x=100$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวราว 6 เปอร์เซ็นต์ โดยสาเหตุที่อัลลอยในระบบนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแตกต่างกันตามสัดส่วนขององค์ประกอบนั้น ก็เนื่องมาจากกว่าโคบอลต์และโครเมียมนั้นมีอุณหภูมิการซินเตอร์ที่แตกต่างกันทำให้พฤติกรรมหดตัวต่างกัันนั่นเองโดยอุณหภูมิซินเตอร์ของโคบอลต์คือ  $1450^\circ\text{C}$  [18] และอุณหภูมิซินเตอร์ของโครเมียมคือ  $1600^\circ\text{C}$  [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

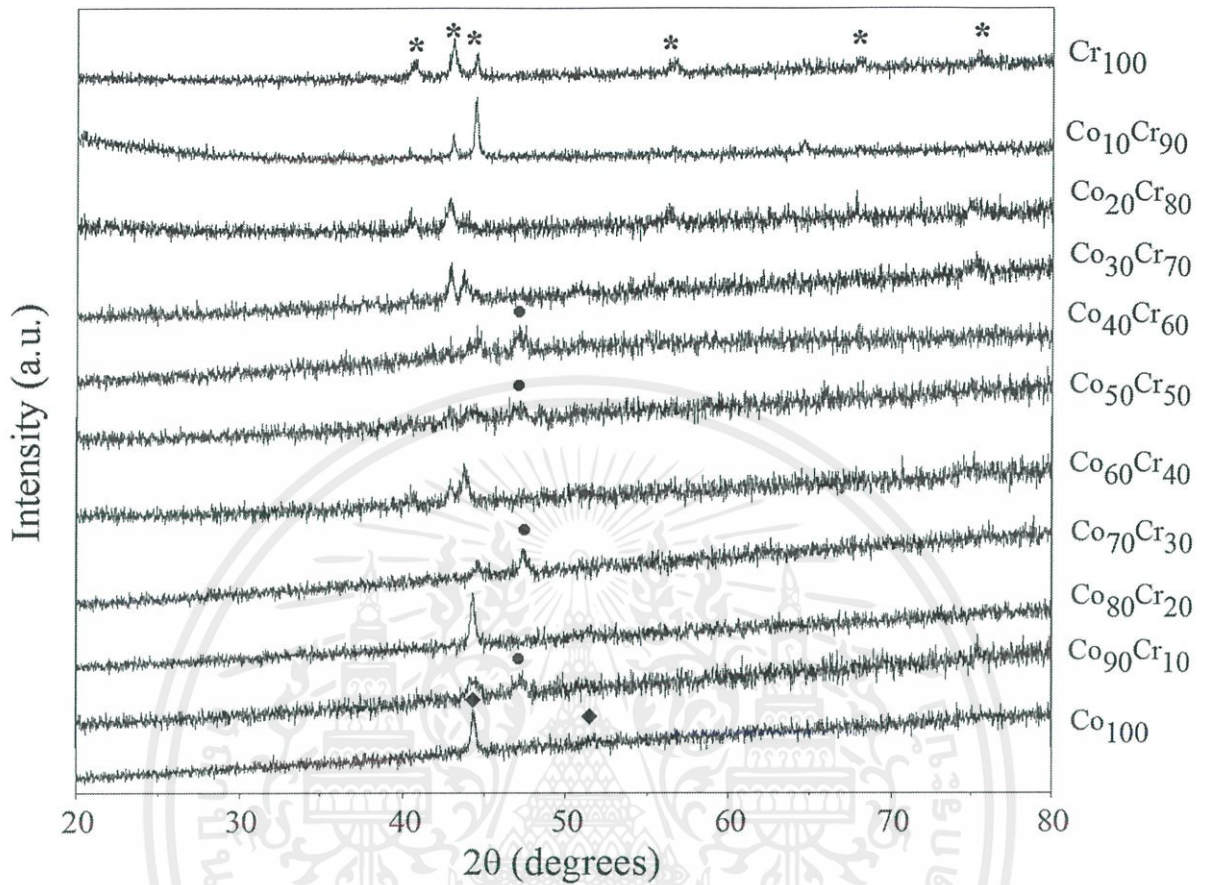


ภาพที่ 4.1 กราฟค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอยที่สัดส่วนต่าง ๆ

#### 4.2 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

นำเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นเตอรืในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.2 โดยจากรูปจะเห็นว่าที่  $x = 0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) มีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่งราว  $44^\circ$  ซึ่งเมื่อตรวจสอบกับไฟล์มาตรฐานแล้วพบว่าสอดคล้องกัน (JCPDS file no. 894307) [20] ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น body centered cubic มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 3.544 \text{ \AA}$  ส่วนที่  $x=100$  (โครเมียมบริสุทธิ์) มีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่งราว  $43^\circ$  ซึ่งเมื่อตรวจสอบกับไฟล์มาตรฐานแล้วพบว่าสอดคล้องกัน (JCPDS file no. 892871) [21] ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น hexagonal closed packing มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 2.722 \text{ \AA}$   $c = 4.434 \text{ \AA}$  โดยสัดส่วนอัลลอยที่ผสมกันระหว่างโคบอลต์กับโครเมียมที่สัดส่วนต่าง ๆ พบว่าการวางตัวอยู่ร่วมกันของทั้งสองเฟสโดยความเข้มของพีคของโครเมียมจะเพิ่มขึ้นตามค่า  $x$  ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบโดยละเอียดก็พบว่ามีพีคที่ไม่ทราบค่าเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta \sim 47^\circ$  ซึ่งคาดว่าเป็นเฟสกึ่งกลางของโคบอลต์-โครเมียม (intermediate phase) ที่มักจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเตรียมเสมอไม่ว่าจะเป็น  $\text{CaO}$   $\text{Co}_3\text{O}_4$   $\text{Cr}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง [22,23,24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



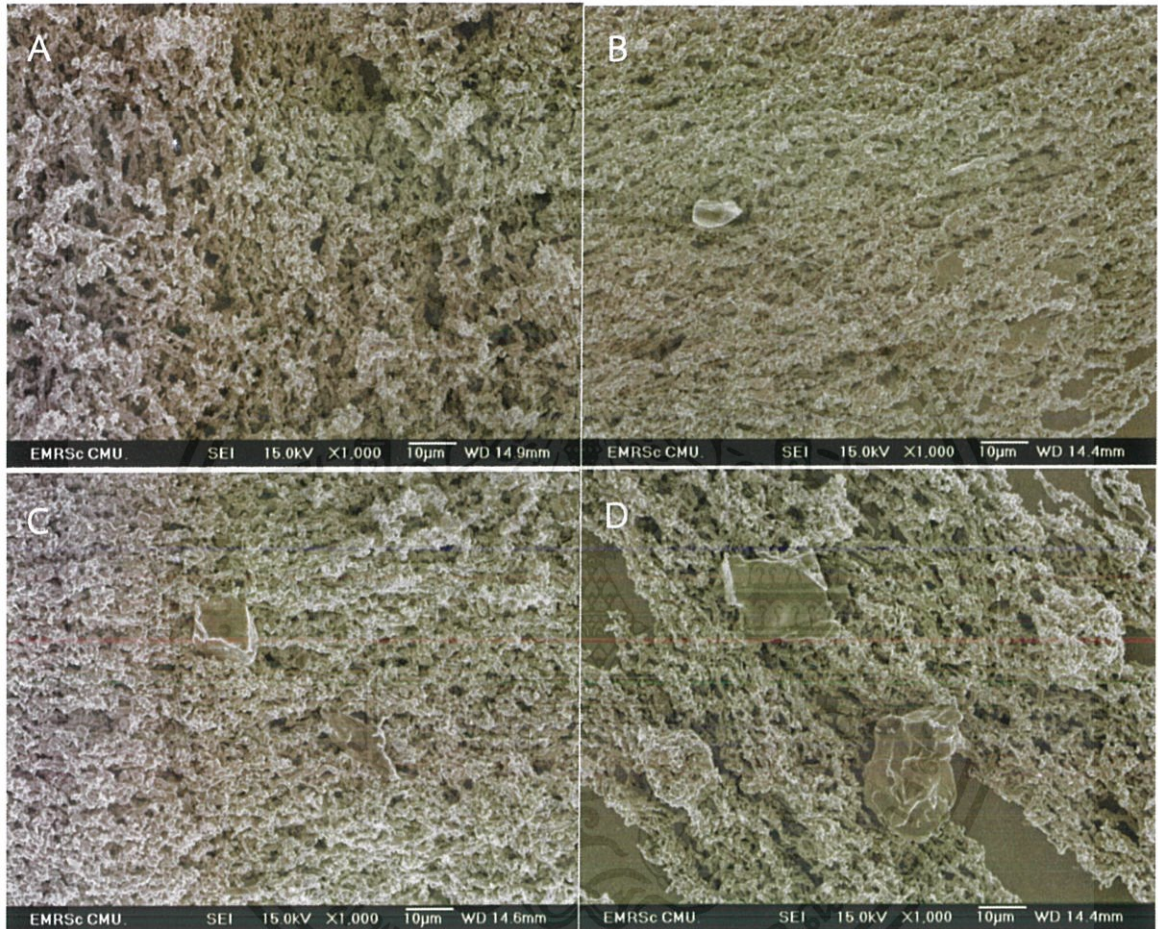
ภาพที่ 4.2 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของเม็ดอัลลอย Co-Cr ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดย \* คือ Cr phase ◆ คือ Co phase ● คือ unknown phase

#### 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา

นำผงอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธีการบดย่อยด้วยครก หยก มาทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ซึ่งภาพทั้งหมดถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่าดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.3 โดยเมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของโคบอลต์เป็นแบบแท่ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตรเกาะกลุ่มกันแบบหลวม ๆ (ภาพ 4.3A) ส่วนอนุภาคของโครเมียมจะมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคโคบอลต์ โดยจะมีลักษณะเป็นก้อนหลายเหลี่ยมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 44 ไมโครเมตร (ภาพ 4.3G) โดยจากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อค่า  $x$  เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นก้อนอนุภาคขนาดใหญ่ปรากฏเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในภาพถ่ายสัณฐานวิทยา ส่วนก้อนอนุภาคขนาดเล็กก็มีปริมาณลดลงตามค่า  $x$  ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานที่ว่าอนุภาคขนาดเล็กคือโคบอลต์และอนุภาค

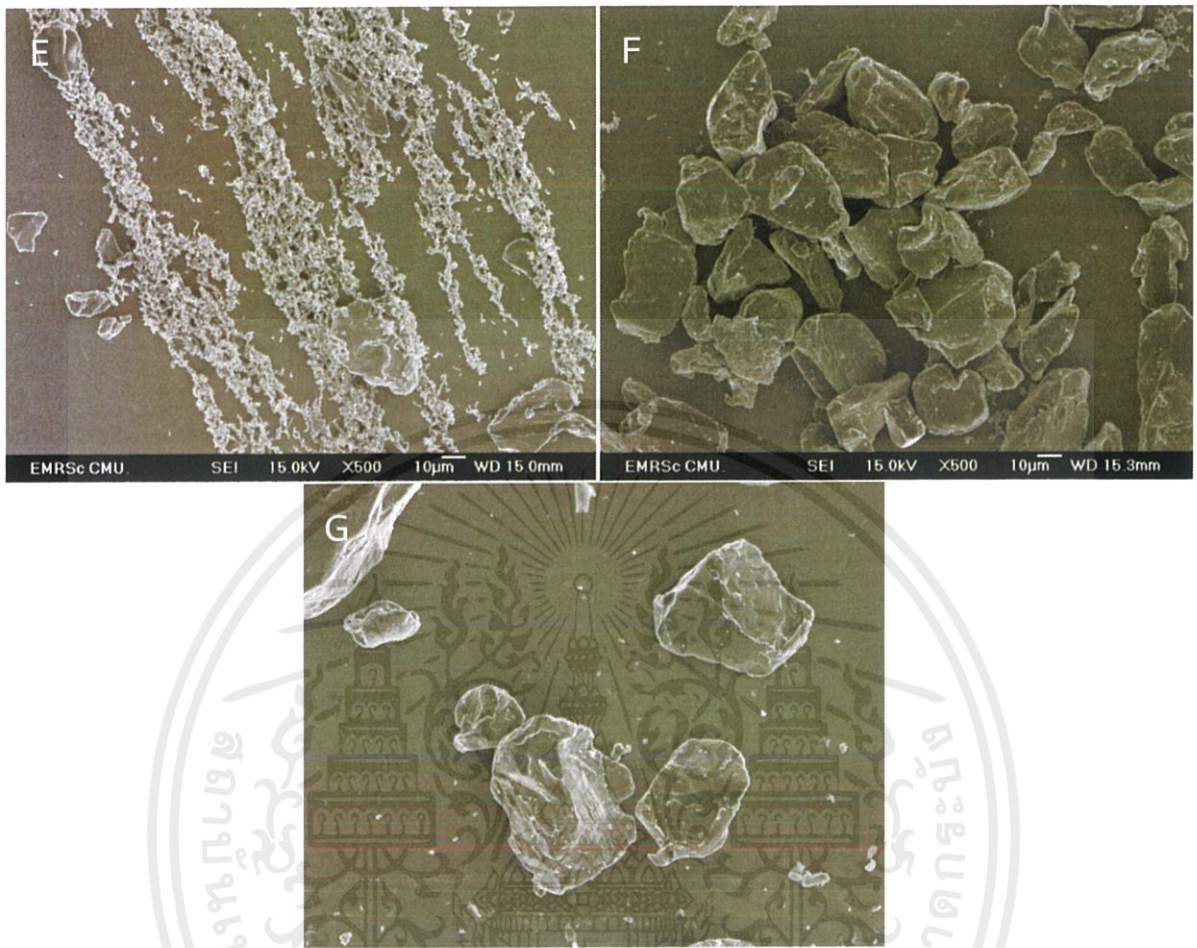
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่คือโครเมียม นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคจากบริษัทผู้ผลิตก็พบว่ามีความ สอดคล้องกัน [25]



ภาพที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอย  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่ (A)  $x = 0$  (B)  $x = 10$  (C)  $x = 30$  (D)  $x = 50$  (E)  $x = 70$  (F)  $x = 90$  และ (G)  $x = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่ (A)  $x = 0$  (B)  $x = 10$  (C)  $x = 30$  (D)  $x = 50$  (E)  $x = 70$  (F)  $x = 90$  และ (G)  $x = 100$  (ต่อ)

จากนั้นนำเม็ดอัลลอยที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน มาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM ซึ่งภาพทั้งหมดถ่ายที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.4 โดยเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่าเกรนมีลักษณะเป็นรูปแบบหลายเหลี่ยม ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซ้อนทับกัน มีความหนาแน่นของเกรนสูงโดยที่  $x=0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) เกรนมีความหนาแน่นตัวสูงมาก มีขนาดเกรนเฉลี่ยราว  $106.94 \mu\text{m}$  (ภาพ 4.4A) และเมื่อผสมโครเมียมลงไปราว 10 เปอร์เซ็นต์พบว่า เกรนมีขนาดเฉลี่ยลดลงและลดลงเรื่อย ๆ ตามปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งการที่ปริมาณโครเมียมในระบบเพิ่มขึ้นแล้วส่งผลให้ขนาดเกรนเล็กลงนั้น คาดว่าเป็นผลมาจากโครเมียมเข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรน ซึ่งเมื่อ  $x \geq 60$

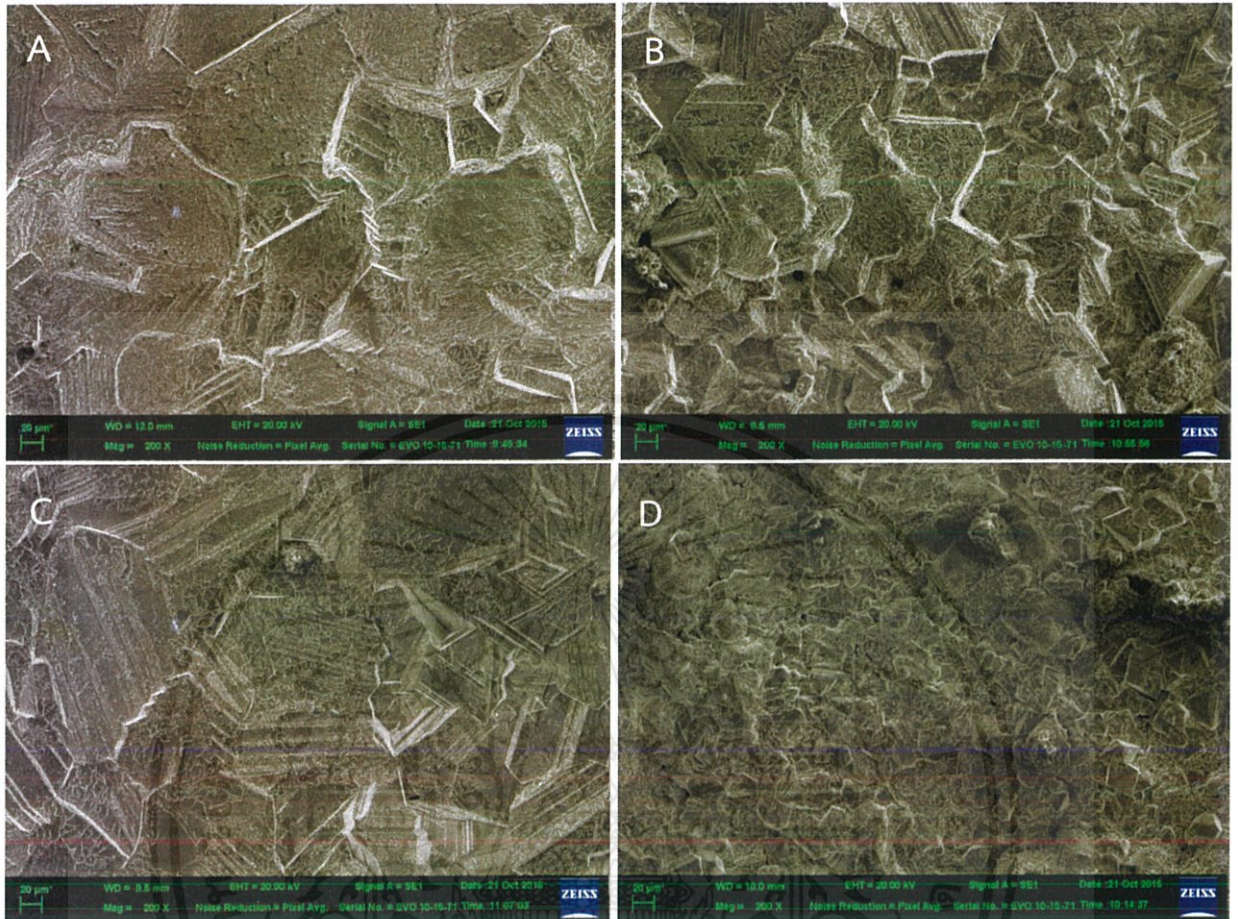
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะไม่เป็นเกรน เนื่องจากอนุภาคได้รับพลังงานไม่เพียงพอในระหว่างกระบวนการซินเตอร์ (อุณหภูมิซินเตอร์ของโครเมียมคือ 1600 °ซ) จึงทำให้โครงสร้างของเม็ดอัลลอยที่สัดส่วน  $x \geq 60$  ไม่ก่อตัวเป็นเกรน

ตารางที่ 4.4 ขนาดเกรนของเม็ดอัลลอย ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่  $x = 0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90$  และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

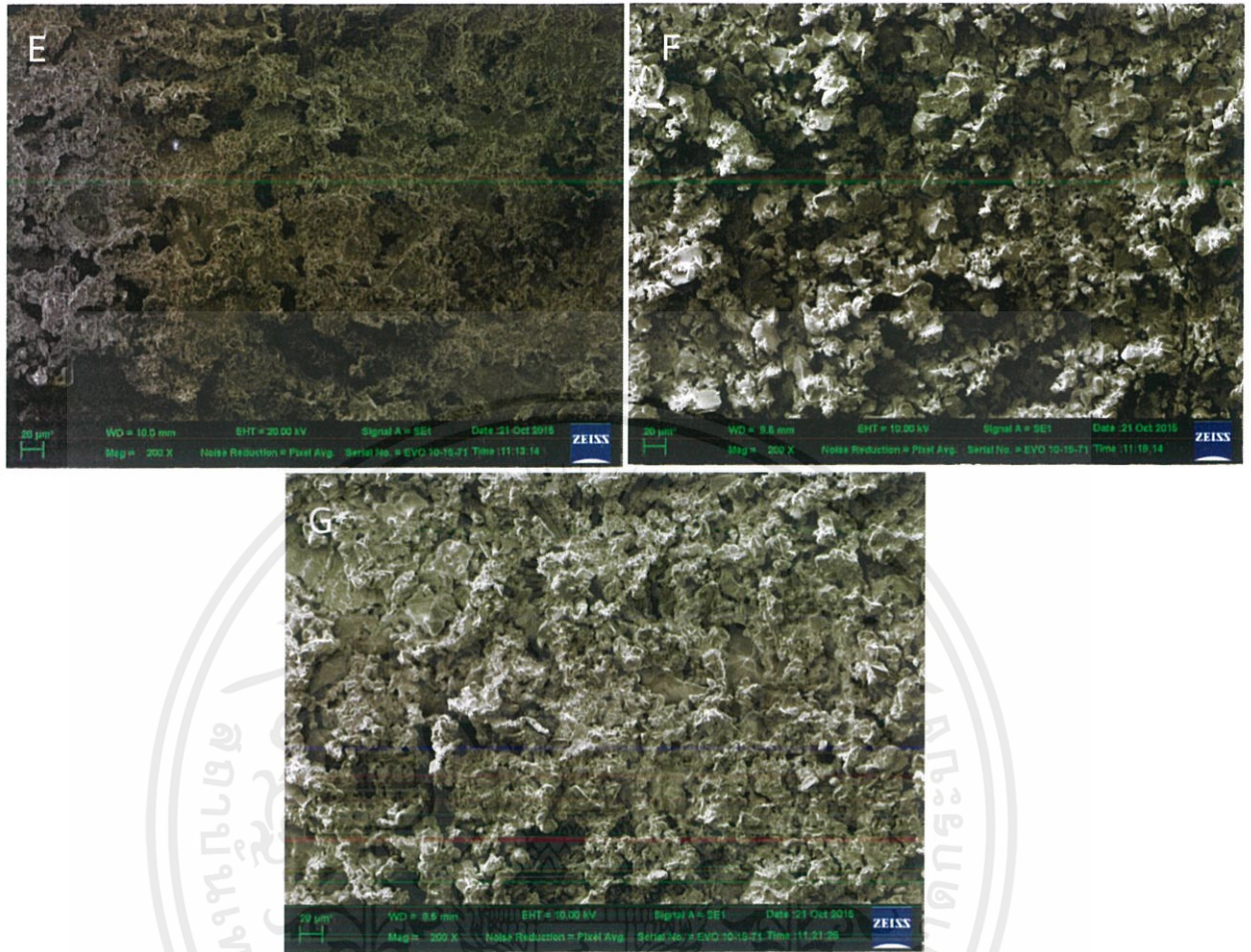
ค่า x	ขนาดเกรนเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
0	$106.94 \pm 19.36$
10	$61.18 \pm 24.82$
30	$69.81 \pm 33.27$
50	$36.81 \pm 8.93$
70	-
90	-
100	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย - หมายถึง ที่สัดส่วน  $x \geq 70$  หาค่าไม่ได้เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะไม่เป็นเกรน



ภาพที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเมตอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่ (A)  $x = 0$  (B)  $x = 10$  (C)  $x = 30$  (D)  $x = 50$  (E)  $x = 70$  (F)  $x = 90$  และ (G)  $x = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเมทัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่ (A)  $x = 0$  (B)  $x = 10$  (C)  $x = 30$  (D)  $x = 50$  (E)  $x = 70$  (F)  $x = 90$  และ (G)  $x = 100$  (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สมบัติเชิงกล

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness) เพื่อเป็นตัวแทนของสมบัติเชิงกลของสารในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  นี้โดยนำเม็ดอัลลอยทั้ง 11 ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์มาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 และ 640 เพื่อให้ผิวหน้าของเม็ดอัลลอยเรียบไม่มีรอยขีดข่วน จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ซึ่งในที่นี้ใช้จะหักกดรูปทรงกลม (sphere) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร และน้ำหนักที่ใช้กดเท่ากับ 450 นิวตัน (N) โดยค่าความแข็งได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5

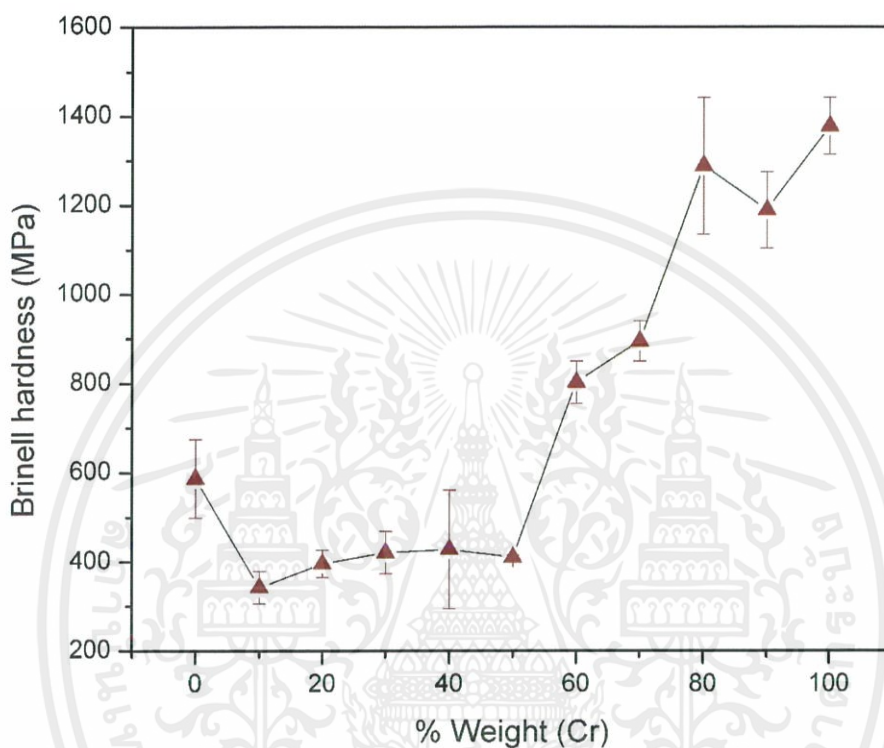
ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งบริเนลล์ของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$

ค่า x	ค่าความแข็งบริเนลล์ (MPa)
0	$587.2 \pm 88.2$
10	$342.4 \pm 36.5$
20	$395.9 \pm 30.8$
30	$421.0 \pm 47.2$
40	$428.0 \pm 133.6$
50	$410.1 \pm 5.6$
60	$803.0 \pm 47.5$
70	$895.4 \pm 44.8$
80	$1288.6 \pm 153.4$
90	$1189.3 \pm 85.5$
100	$1378.0 \pm 64.1$

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า  $\text{Cr}_{100}$  มีค่าความแข็งมากที่สุดคือราว 1378 MPa และสัดส่วนที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ  $\text{Co}_{10}\text{Cr}_{90}$  โดยเมื่อนำข้อมูลในตารางมาพลอตเป็นกราฟได้ผลดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโครเมียมที่เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าโครเมียมมีความแข็งแรงมากกว่าโคบอลต์ ยิ่งสัดส่วนปริมาณของโครเมียมมากขึ้นค่าความแข็งของเม็ดอัลลอยก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ค่าความแข็งตามทฤษฎีของโคบอลต์มีค่าอยู่ในช่วง 470–3000 MPa [26] และของโครเมียมมีค่าอยู่ในช่วง 687–6500 MPa [27] ซึ่งสาเหตุที่ค่าความแข็งในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองมีความคลาดเคลื่อนสูงจากทฤษฎีมากนั้นก็ เป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค และรูปพรุนจำนวนมากในชิ้นงานดังแสดงในรูป SEM ในหัวข้อที่ 4.4 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

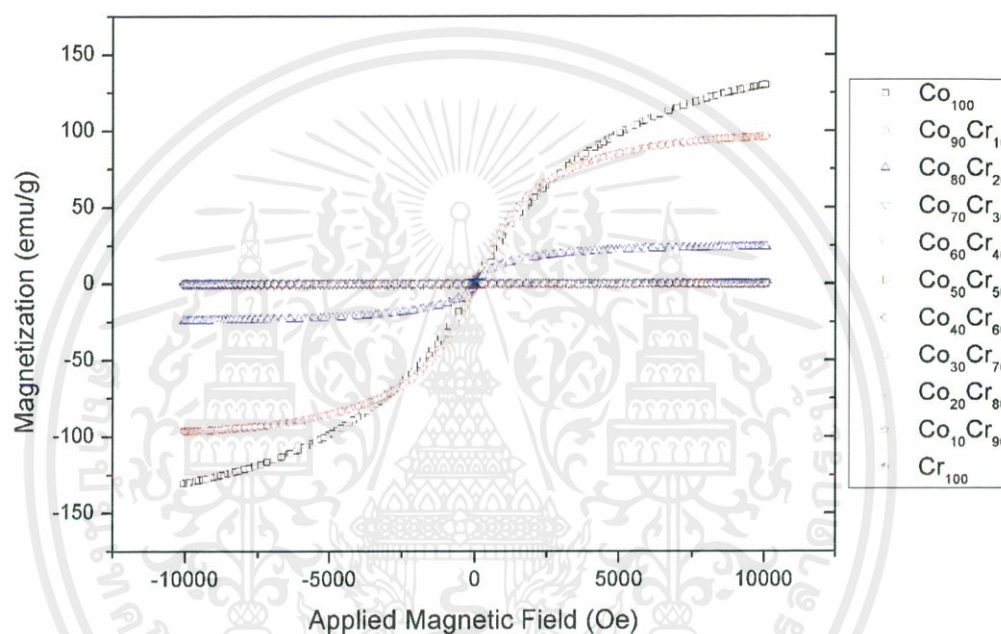


ภาพที่ 4.5 กราฟค่าความแข็งบริเนลล์ของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.5 สมบัติแม่เหล็ก

ในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นจะศึกษาด้วยวิธีการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก (magnetic hysteresis loop) โดยใช้เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยหลักการสั่น (vibrating sample magnetometer; VSM) โดยเริ่มจากนำเม็ดอัลลอยไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กที่มีค่า  $10 \text{ kOe}$  ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงให้สนามแม่เหล็กเข้าไปซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่สัดส่วน  $x = 0, 10$  และ  $20$  กราฟจะปรากฏเป็นฮีสเทอรีซิสลูปทางแม่เหล็กอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สัดส่วน  $x = 0, 10$  และ  $20$  เม็ดอัลลอยมีสภาพแม่เหล็กเป็นแบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetism) และมีความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnet) สังเกตได้จากพื้นที่ในลูปมีน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ส่วนที่สัดส่วน  $30 \leq x \leq 100$  จะเห็นว่ากราฟไม่ปรากฏเป็นฮิสเทอริซิสลูปทางแม่เหล็ก ซึ่งคาดว่าเม็ดอัลลอยที่องค์ประกอบเหล่านี้ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหรือมีสภาพแม่เหล็กพาราแมกเนติก (paramagnetic) จึงไม่สามารถสังเกตเห็นการเกิดฮิสเทอริซิสลูปทางแม่เหล็กได้เลย ทั้งนี้จากข้อมูลที่ได้สามารถอ่านค่าแมกนีไทเซชันสูงสุด ( $M_s$ ) ค่าสนามลบล้าง ( $H_c$ ) และค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง ( $M_r$ ) ดังตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 วงวนฮิสเทอริซิสลูปแม่เหล็กของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สมบัติแม่เหล็กของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  ได้แก่ ค่าแมกนีโตเซชันสูงสุด ( $M_s$ ) ค่าสนามแม่เหล็กกลบล้าง ( $H_c$ ) และค่าแมกนีโตเซชันคงค้าง ( $M_r$ ) ของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ค่า x	แมกนีโตเซชันสูงสุด ( $M_s$ ) (emu/g)	ค่าแมกนีโตเซชันคงค้าง ( $M_r$ ) (emu/g)	ค่าสนามแม่เหล็กกลบล้าง ( $H_c$ ) (kOe)
0	130.52	1.37	49.81
10	96.18	1.48	37.95
20	24.00	0.98	25.10
30	0.75	-	-
40	0.21	-	-
50	0.11	-	-
60	0.08	-	-
70	0.07	-	-
80	0.08	-	-
90	0.05	-	-
100	0.05	-	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย - หมายถึง ที่สัดส่วน  $x \geq 30$  หาค่าไม่ได้เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก

จากข้อมูลในตารางจะเห็นว่าค่าแมกนีโตเซชันสูงสุด ( $M_s$ ) มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนโครเมียมที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า โคบอลต์มีสภาพแม่เหล็กเป็นแบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetism) ในขณะที่กันโครเมียมมีสภาพแม่เหล็กเป็นแบบพาราแมกเนติก (paramagnetic) ดังนั้นการที่โคบอลต์มีเฟสของโครเมียมมาเจือปนก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของเฟสแม่เหล็กลดลงนั่นเอง ส่วนค่า  $M_r$  และ  $H_c$  ของสัดส่วน  $x = 0, 10$  และ  $20$  นั้นก็พบว่าค่าสนามแม่เหล็กกลบล้าง (ค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้โดเมนแม่เหล็กกลับทิศ;  $H_c$ ) และค่าแมกนีโตเซชันคงค้าง (ค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกลับทิศโดเมนแม่เหล็กค่า  $H$  ที่ทำให้  $M$  มีค่าเป็น 0;  $M_r$ ) ก็มีแนวโน้มที่จะลดลงตามสัดส่วนโครเมียมที่เพิ่มขึ้น สำหรับที่สัดส่วน  $30 \leq x \leq 100$  นั้นไม่สามารถหาค่า  $M_r$  และ  $H_c$  ได้ เนื่องจากวัสดุไม่แสดงลักษณะของฮิสเทอรีซิสลูปออกมาเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ตามสูตรดังนี้  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการเตรียมอัลลอยแบบดั้งเดิมซึ่งได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางแม่เหล็ก เฟสที่เกิดขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากนั้นจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบทั้งนี้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการทดลองมีดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถประดิษฐ์อัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ตามสูตรดังนี้  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยเทคนิคการเตรียมอัลลอยแบบดั้งเดิมร่วมกับการขึ้นเตอรืในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $120$  นาที โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$  ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบ

5.1.2 จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดอัลลอยที่สัดส่วน  $x = 0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) มีค่าเยอะที่สุดโดยมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์อยู่ที่  $93.05$  เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อสัดส่วนของโครเมียมเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความสัมพัทธ์มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรูพรุนในระหว่างกระบวนการขึ้นเตอรื อีกทั้งค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโคบอลต์มีค่าเท่ากับ  $8.9\text{ g/cm}^3$  ซึ่งมากกว่าโครเมียม โดยค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโครเมียมจะอยู่ที่  $7.14\text{ g/cm}^3$  ดังนั้นเมื่อเม็ดอัลลอยมีสัดส่วนของโครเมียมเป็นองค์ประกอบจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นลดลงนั่นเอง

5.1.3 จากการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่  $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัว  $18.30$  เปอร์เซ็นต์แต่ที่สัดส่วน  $x = 100$  (โครเมียมบริสุทธิ์) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเป็น  $6.38$  เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นเพราะโคบอลต์-โครเมียมมีอุณหภูมิขึ้นเตอรืที่แตกต่างกันจึงทำให้มีพฤติกรรมการหดตัวที่แตกต่างกันนั่นเอง

5.1.4 โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_{(x)}$  โดยที่  $x = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  และ  $90$  พบว่ามีความเป็นโลหะผสม (อัลลอย) ซึ่งยืนยันจากการปรากฏของเฟสโคบอลต์ และเฟสโครเมียมร่วมกันในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของผงโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าอนุภาคของโคบอลต์มีลักษณะเป็นแบบแท่ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตรเกาะกลุ่มกันแบบหลวม ๆ ส่วนอนุภาคของโครเมียมจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคโคบอลต์ โดยจะมีลักษณะเป็นก้อนหลายเหลี่ยมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 44 ไมโครเมตร

5.1.6 จากการตรวจสอบลักษณะลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าเกรนของเม็ดอัลลอยเป็นมีลักษณะเป็นรูปแบบหลายเหลี่ยม ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน โครงสร้างของเกรนมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซ้อนทับกัน มีความหนาแน่นของเกรนสูง โดยที่  $x=0$  (โคบอลต์บริสุทธิ์) เกรนมีความหนาแน่นตัวสูงมาก มีขนาดเกรนเฉลี่ยราว 106.94  $\mu\text{m}$  ซึ่งจากการสังเกตขนาดเกรนของเม็ดอัลลอย พบว่าขนาดเกรนลดลงตามสัดส่วนโครเมียมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่สัดส่วน  $x = 50$  มีขนาดเกรนเล็กที่สุดเฉลี่ยราว 36.81  $\mu\text{m}$  แต่ที่สัดส่วน  $x \geq 60$  พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะไม่เป็นเกรน เนื่องจากอนุภาคได้รับพลังงานไม่เพียงพอในระหว่างกระบวนการซินเตอร์ (อุณหภูมิซินเตอร์ของโครเมียมคือ 1600 °ซ)

5.1.7 จากการตรวจสอบค่าความแข็งของเม็ดอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์พบว่าโครเมียมมีค่าความแข็งเยอะกว่าโคบอลต์ โดยโครเมียมมีค่าความแข็งอยู่ที่ 1378 MPa ในขณะที่โคบอลต์มีค่าความแข็งอยู่ที่ 587.2 MPa โดยค่าความแข็งของเม็ดอัลลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากค่าความแข็งของโครเมียมเยอะกว่าโคบอลต์นั่นเอง

5.1.8 จากการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของเม็ดอัลลอยในระบบ  $\text{Co}_{(100-x)}\text{Cr}_x$  โดยที่  $x = 0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90$  และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยวิธีการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสทางแม่เหล็ก (magnetic hysteresis loop) โดยใช้เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยหลักการสั่น (vibrating sample magnetometer; VSM) พบว่าเม็ดอัลลอยที่สัดส่วน  $x = 0 \ 10$  และ 20 เม็ดอัลลอยแสดงสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetism) และมีความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnet) เนื่องจากพื้นที่ในฮีสเทอรีซิสลูปมีน้อยมากโดยที่สัดส่วน  $x = 0$  มีค่าแมกนีโตเซชันสูงที่สุด ( $M_s$ ) คือ 130.52 (emu/g) แต่ที่สัดส่วน  $30 \leq x \leq 100$  พบว่าเม็ดอัลลอยไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กออกมา (ไม่ปรากฏเป็นฮีสเทอรีซิสลูปทางแม่เหล็ก) ซึ่งคาดว่าเม็ดอัลลอยที่องค์ประกอบเหล่านี้ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหรือมีสภาพแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก (paramagnetic) จึงไม่สามารถสังเกตเห็นการเกิดฮีสเทอรีซิสลูปทางแม่เหล็กได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในระหว่างกระบวนการอัดเม็ดอัลลอยสภาพอากาศ ความชื้น มีผลต่อเม็ดอัลลอยกล่าวคือ ถ้าผงโคบอลต์-โครเมียมมีความชื้นสูงจะทำให้เม็ดอัลลอยเกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ดังนั้นก่อนอัดเม็ดควรนำผงโคบอลต์-โครเมียมไปอบที่อุณหภูมิ 100 °ซ ก่อนที่จะทำการอัดเม็ด

5.2.2 สำหรับชิ้นงานอัลลอยนั้นจำเป็นต้องมีการขึ้นรูปด้วยแรงที่เหมาะสม หากใช้แรงในการอัดขึ้นรูปไม่มากพอ จะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจะมีความเสียหาย และไม่ได้ชิ้นงานอัลลอยตามที่ต้องการ

5.2.3 สำหรับขั้นตอนการเผาชิ้นเตอร์ควรรีใช้เตาเผาตัวเดิมตลอดการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาแต่ละตัวอาจมีความคลาดเคลื่อนซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อชิ้นงานได้

5.2.4 สำหรับการนำ Co-Cr ไปใช้งานเป็นวัสดุตัวกลางทางแม่เหล็ก ควรเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางและศึกษาผลของโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วย



## บรรณานุกรม

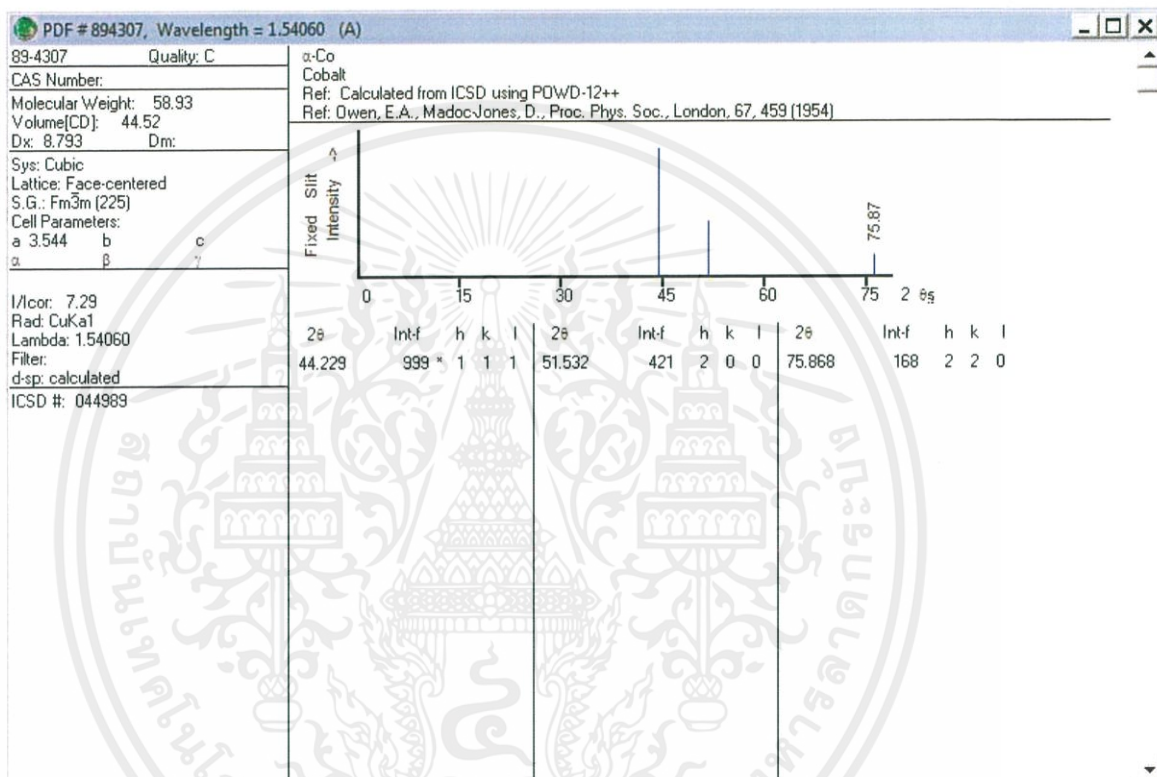
- [1] [Online]. Available :  
<http://www.cs.uah.edu/~rcoleman/Common/History/History.html>
- [2] [Online]. Available : <http://www.pctodaythailand.com/seagate-8tb-hdd-word-first/>
- [3] [Online]. Available : <http://www.pcguide.com/ref/hdd/hist.htm>
- [4] [Online]. Available : <http://resource.npl.co.uk/mtdata/phdiagrams/cocr.htm>
- [5] [Online]. Available : <http://www.thecdi.com/>
- [6] J.A. Betancourt-Cantera, F. Sánchez-De Jesús, et. al. 2014. “Structural Analysis and Magnetic Properties of Solid Solutions of Co–Cr System Obtained by Mechanical Alloying.” J. Magn. Magn. Mater. (354) : 178-183
- [7] G.W. Qin, K. Oikawa, et. al. 2001. “Magnetically Induced Phase Separation in the Co–Cr Binary System.” J. Magn. Magn. Mater. (234) : L1-L5
- [8] J.C. Lodder 1996. “Magnetic Structures in Co-Cr Media for Perpendicular Magnetic Recording.” J. Magn. Magn. Mater. (159) : 238-248
- [9] GREGORY L. McINTIRE, CHARLES F. BRUCKER. 1988. “Cobalt Chromium Perpendicular Magnetic Recording Media: A Corrosion Study.” IEEE Trans. Magn. 24(5)
- [10] [Online]. Available : [http://www.mne.eng.psu.ac.th/lek\\_files/ceramic/u64-2.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/lek_files/ceramic/u64-2.htm)
- [11] [Online]. Available : <http://www.vt-sun.com/index.php>
- [12] [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s_law)
- [13] [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php>
- [14] [Online]. Available :  
<http://mxp.physics.umn.edu/s03/projects/s03moke/theory.htm>
- [15] [Online]. Available : [http://www.wikiwand.com/en/Raman\\_scattering](http://www.wikiwand.com/en/Raman_scattering)
- [16] [Online]. Available : [http://personal.sut.ac.th/.../Measurement\\_Of\\_Hardness.html](http://personal.sut.ac.th/.../Measurement_Of_Hardness.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] [Online]. Available : [http://www.tecsco.co.kr/spm/02\\_09.php](http://www.tecsco.co.kr/spm/02_09.php)
- [18] [Online]. Available : [https://www4.dcu.ie/sites/default/files/apt/Ceramic%20CoFe\\_Sintering\\_2008.pdf](https://www4.dcu.ie/sites/default/files/apt/Ceramic%20CoFe_Sintering_2008.pdf)
- [19] [Online]. Available : <https://books.google.co.th/books?id=cLnzBwAAOBAJ&pg=PA193&lpg=PA193&dq=sintering%20temperature%20of%20pure%20chromium&source=bl&ots=kSbSOCjRPK&sig=CMsDRwid7Y6rt47q0-S->
- [20] JCPDS file no. 89-4307
- [21] JCPDS file no. 89-2871
- [22] JCPDS file no. 02-0770
- [23] D. J. S. Hyslop, A. M. Abdelkader, A. Cox, and D. J. Fray. 2010. "Electrochemical synthesis of a biomedically important Co–Cr alloy." *Acta Materialia*. (58) : 3124-3130.
- [24] J. Jankowski, G. Thomas, and L. P. Camby. 1997. "Kinetic study of the cobalt chromite synthesis by reaction in the solid state between cobalt oxide  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and chromium oxide  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ." *Solid State Ionics*. (101–103) : 1321-1326.
- [25] Sigma aldrich
- [26] [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Cobalt>
- [27] [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromium>

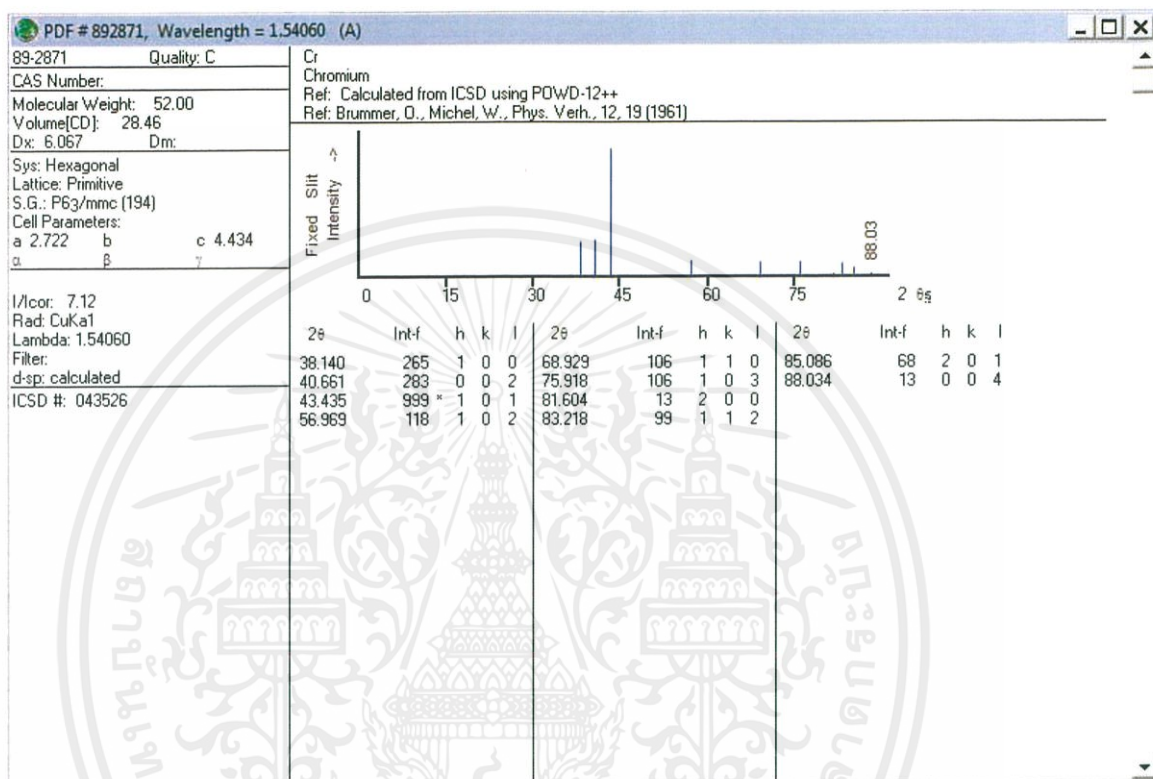
## ภาคผนวก ก

ข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของโคบอลต์ หมายเลข 89-4307



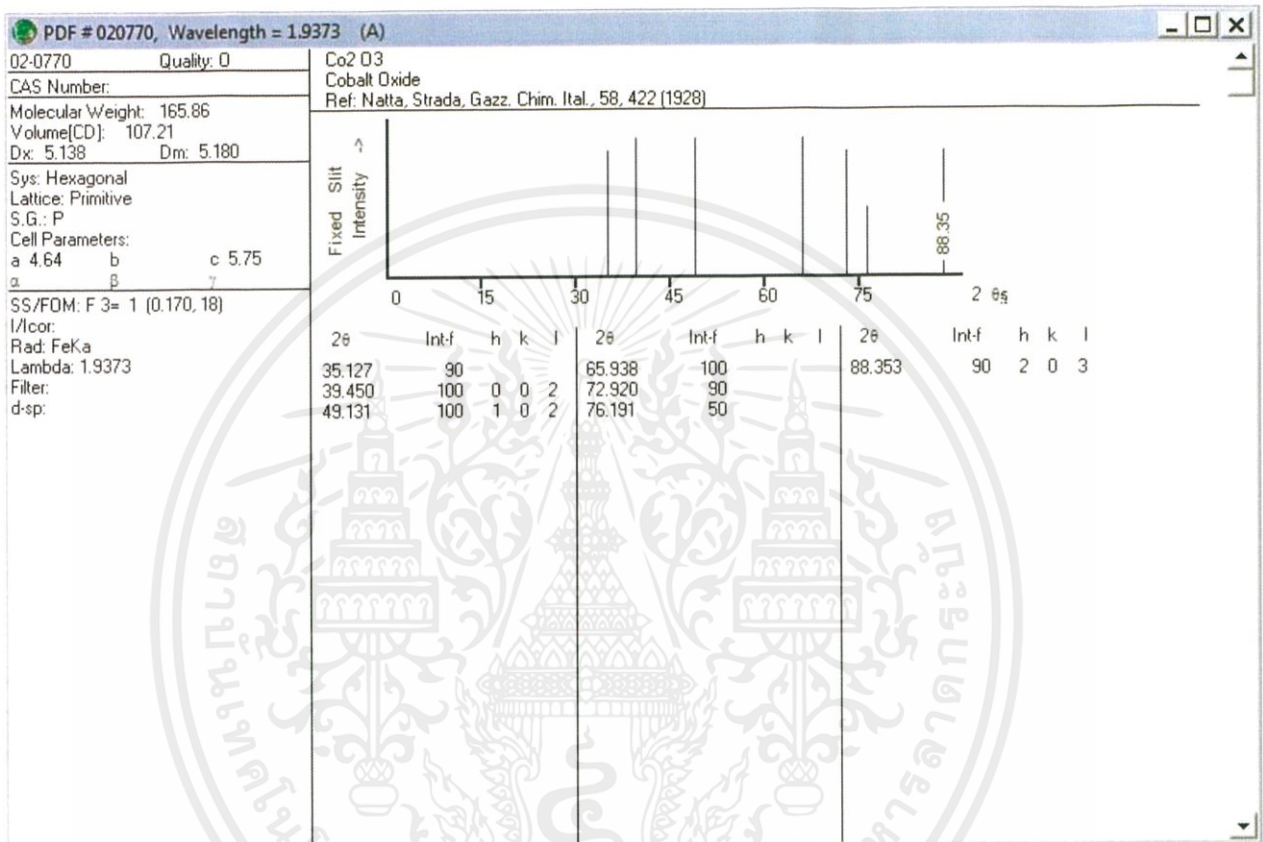
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของโคบอลต์ หมายเลข 89-2871



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของโคบอลต์ออกไซด์ หมายเลข 02-0770



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายทัชชกร ศักดิ์แก้ว ชื่อภาษาอังกฤษ Tatchakorn Sakkaew เกิดวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2536 ที่อยู่ในปัจจุบัน 184/3 ถ.หลักช้าง ต.ท่ายาง อ.ทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนรัตนศึกษา จังหวัดนครศรีธรรมราช จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา ปีที่ 6 จากโรงเรียนทุ่งใหญ่วิทยาคม จังหวัดนครศรีธรรมราช ในปีการศึกษา 2554 ในปีการศึกษา 2555 ได้เข้า ศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ นาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้