



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนากระบวนการผลิตและการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของ  
อัลลอยโคบอลต์-โครเมียมที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิมเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุ  
ที่ฝังในร่างกาย

Processing Development and In Vitro Biocompatibility Testing of  
Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method for  
Surgical Implants

รองศาสตราจารย์ ดร. วรณวิสัย วิทยาการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยนี้จะต้องแจ้งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยของตนก่อนนำเอกสารนี้ไปใช้  
This material is for research purposes only and is not intended for commercial use. Please inform the purpose of your research before using this material.

Forbiden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)..... การพัฒนากระบวนการผลิตและการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ  
 ของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิมเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกาย.....  
 แหล่งเงิน ...ทุนอุดหนุนวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน).....  
 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561... สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....  
 ประจำปีงบประมาณ..... 2561..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 369,700..... บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561  
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ...รองศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไลย์ วิทยาการ.....  
 หน่วยงานต้นสังกัด..... วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.....

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมให้สามารถประดิษฐ์อัลลอยโคบอลต์-โครเมียมสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายที่มีศักยภาพสูงได้ โดยจะใช้เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอสร่วมกับการกดอัดด้วยความร้อน จากนั้นตามด้วยการบำบัดทางความร้อนแล้วจึงทำการตรวจสอบพฤติกรรมการแน่นตัว เพลสที่เกิดขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมด จากนั้นทำการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยนี้ด้วยการแช่วัสดุที่เตรียมได้ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนเป็นระยะเวลาแตกต่างกัน (3, 7, 15 และ 30 วัน) ภายใต้สภาวะจำลองจาลองของร่างกาย แล้วจึงตรวจสอบปริมาณไอออนโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมายังของเหลว ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการที่อัลลอยผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแล้วจะทำให้ขนาดผลึกเล็กลงซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกภายในชิ้นงานเมื่อได้รับพลังงานจากความร้อน ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงลดลงอีกทั้งความเครียดในชิ้นงานลดลงด้วยจึงทำให้ไอออนเกิดการหลุดออกมายังสิ่งแวดล้อมได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ : โคบอลต์ โครเมียม กระบวนการผลิต ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

**Research Title:**.....Processing, Development and In Vitro Biocompatibility Testing of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method for Surgical Implants.....  
**Researcher:** Assoc. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn.....  
**Faculty:**..... College of Nanotechnology Ladkrabang.....

## ABSTRACT

In this work, the convention processing of cobalt-chromium alloy fabrication was developed in order to apply in high potential body-implantation. The ball-milling technique was combined with hot-pressing technique to get highly dense alloys. After that, all alloys were treated with high temperature. Densification behavior, phase formation and microstructure of all samples were investigated. The biocompatibility of all alloys was then investigated by immersing samples in simulated body fluid (SBF) for various days (3, 7, 15 and 30 days) and examined the releasing ions in those fluids. The results show that after treated with thermal the crystallite size of all samples was decrease because recrystallization occurred after received energy from high temperature. The microstructure of alloys also changed. Higher toughness, lower hardness and lower strain happened in these alloys which resulted in easily ion releasing to environment.

**Keywords :** Cobalt; Chromium; Processing; Biocompatibility

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่และเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นักศึกษาในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก และเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการทุกท่านที่ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดทางผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

รองศาสตราจารย์ ดร. วรณวิสัย วิทยากร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ซ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฅ
กิตติกรรมประกาศ	ญ
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี สมมุติฐาน กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง</b>	9
2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	9
2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	13
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	15
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	15
3.2 สารเคมีที่ใช้	17
3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	17
3.4 กระบวนการเตรียมผงโคบอลต์ – โครเมียม (Co -Cr)	18
3.5 กระบวนการเตรียมเม็ดอัลลอย	21
3.6 กระบวนการบำบัดความร้อน	22
3.7 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ	23
3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและพื้นผิว	24
3.8 การตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility)	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่จะขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อน และต้องแจ้งถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ใช้การวิจัยที่มีดำเนินการแล้วใช้

This material is copyright of the author and is intended for personal use only. It is not to be used for commercial purposes.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	27
4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	27
4.2 ผลการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น	28
4.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุ	29
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิว	36
4.5 การตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ	41
4.6 ผลของการบำบัดด้วยความร้อน	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	48
5.1 สรุปผลการวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
<b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย</b>	50
6.1 ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ	50
6.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ	50
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	51
<b>ภาคผนวก</b>	52
เอกสารผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ	52
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	53

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อ	2
ตารางที่ 2.1 ราคาค่าใช้จ่ายของการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกาย	10
ตารางที่ 3.1 สรุปความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย SBF ชนิดต่าง ๆ เทียบกับพลาสมาของเลือด	16
ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายจำลองพลาสมาของเลือด	16
ตารางที่ 3.3 ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายจำลองพลาสมาของเลือดเทียบกับความเข้มข้นของเลือด	26
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานอัลลอยทั้งหมด	28



# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอย $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการบดย่อยแบบต่าง ๆ โดย (ก) การบดด้วยครกหยก (ข) การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบแห้ง และ (ค) การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก	4
รูปที่ 2.1 วัสดุโลหะหลักที่นำไปใช้งานทางการแพทย์เป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายและความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อน	12
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองและตัวอย่างการเกิดการกัดกร่อนแบบ (ก) crevice และ (ข) galvanic	12
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองทั้งหมด	19
รูปที่ 3.2 ขวดพลาสติกผสมสาร	19
รูปที่ 3.3 เครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล (ball - milling)	20
รูปที่ 3.4 ตู้อบสาร	20
รูปที่ 3.5 ครกหยกบดสาร	21
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการกัดอัดชิ้นงานแบบแกนเดี่ยวรวมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วย	21
รูปที่ 3.7 เม็ดอัลลอยที่ผ่านการกัดอัดแบบแกนเดี่ยวรวมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วย	22
รูปที่ 3.8 แผนผังการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงชิ้นงานด้วยการอบอ่อน (annealing)	22
รูปที่ 3.9 เต้าไฟฟ้าสำหรับบำบัดด้วยความร้อน	23
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	24
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)	25
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (AAS)	26
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะกายภาพเบื้องต้นของวัสดุในระบบ Co-Cr ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ	27
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ	29
รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ	30
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย $60\text{Co}-25\text{Cr}-15\text{W}$	31
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย $60\text{Co}-25\text{Cr}-5\text{Mo}-10\text{W}$	32
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย $65\text{Co}-28.5\text{Cr}-6\text{Mo}-0.5\text{Ni}$	33

	หน้า
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 35Co-35Ni-20Cr-10Mo	34
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 70Co-30Cr	35
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 60Co-25Cr-15W	36
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 60Co-25Cr-5Mo-10W	
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni	37
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 35Co-35Ni-20Cr-10Mo	38
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 70Co-30Cr	39
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะโครเมียมของชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดที่ตรวจสอบได้จากสารละลาย SBF ที่มีการแช่ชิ้นงานทิ้งไว้ในเป็นเวลา 3, 7, 15 และ 30 วัน	42
รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นสำหรับอัลลอยทั้งหมดก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยการอบอ่อน (annealing)	43
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุในระบบ Co-Cr ก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยการอบอ่อน (annealing)	44
รูปที่ 4.17 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนโดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทิ้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กัน	46
รูปที่ 4.18 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแล้ว โดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทิ้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กัน	46
รูปที่ 4.19 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF ที่แช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อนด้วยเงื่อนไขที่กำหนด	47

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ขอบเขตของโครงการวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย ประโยชน์ ผลสำเร็จ และความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ตามที่คุณวิจัยได้ทำการเขียนโครงการวิจัยเพื่อขอทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี พ.ศ. 2560 ในหัวข้อเรื่องการพัฒนาประสิทธิภาพของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายซึ่งเป็นการกล่าวถึงวัสดุเทียมที่ฝังในร่างกายในปัจจุบันนั้นมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศเกือบทั้งหมดทำให้มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งงานวิจัยภายในประเทศไทยที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุกลุ่มนี้ยังมีอยู่น้อยมาก อีกทั้งยังไม่มีบริษัทเอกชนรายใดกล้าลงทุนเกี่ยวกับอุตสาหกรรมนี้เลยเนื่องจากกังวลเรื่องต้นทุนที่สูงเกินไป ทั้งนี้มีความต้องการใช้งานเป็นจำนวนมากและประเทศไทยเองก็เริ่มเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแล้ว [1] ทั้งนี้โครงการวิจัยดังกล่าวนี้ก็ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (อยู่ในขั้นตอนการจัดลำดับของสถาบันและทำสัญญา) ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าข้อมูลและทำการทดลองเบื้องต้นในการผลิตวัสดุเทียมแบบฝังในไประยะหนึ่งแล้ว และจากผลการทดลองเบื้องต้นก็พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสามารถผลิตวัสดุเทียมแบบฝังในโดยใช้องค์ความรู้ในการเตรียมวัสดุแบบดั้งเดิมด้วยหลักการของกรรมวิธีโลหะผง (powder metallurgy) ให้มีคุณภาพดีเทียบเท่ากับวัสดุทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศได้และเชื่อว่าการสามารถผลิตวัสดุนี้ได้เองภายในประเทศก็จะช่วยลดต้นทุนผลิตภัณฑ์ได้มาก ทั้งนี้ในแผนดำเนินการของโครงการวิจัยปี 2560 นั้นจะมุ่งเน้นไปที่ความพยายามในการสังเคราะห์และประดิษฐ์วัสดุด้วยเทคนิคแบบดั้งเดิมดังกล่าว พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเตรียมที่มีต่อเพลสที่เกิดขึ้น สมบัติทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เป็นฐาน รวมไปถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของวัสดุ อย่างไรก็ตามในแผนดำเนินการ 1 ปีที่กำหนดไว้นั้นยังไม่ครอบคลุมถึงขั้นตอนการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพโดยละเอียดและเป็นลำดับขั้นตอนเลยเนื่องจากระยะเวลาไม่เพียงพอ อีกทั้งในการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพนั้นจะต้องทั้งขึ้นงานไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้วัสดุแสดงประสิทธิภาพออกมาอย่างเต็มที่ ซึ่งผลที่จะได้รับการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพนี้ถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุด

สำหรับการนำไปพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจริงในร่างกายของสิ่งมีชีวิตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะนี้และต้องสงวนสิทธิ์ในอำนาจของเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้

This material is copyrighted for educational purposes only. All rights reserved for copyright holders.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) เป็นความสามารถของวัสดุที่มนุษย์พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้คงอยู่ได้ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตในช่วงเวลาหนึ่งโดยไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ซึ่งวัสดุทุกชนิดที่นำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์นั้นล้วนแล้วแต่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ แต่จะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน โดยวัสดุชีวภาพสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของชั้นวัสดุซึ่งนำไปใช้ในร่างกาย (implant) กับเนื้อเยื่อได้ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ดังนั้นในการนำวัสดุทางชีวภาพชนิดใดชนิดหนึ่งมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการศึกษาความเข้ากันได้กับร่างกายก่อน ซึ่งได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับการมีปฏิกิริยาต่อสภาพแวดล้อมทางชีวภาพ (bioactivity) ของวัสดุดังกล่าว ซึ่งเป็นความสามารถในการเกิดพันธะทางเคมีกับกระดูกเพื่อช่วยในการยึดเกาะโดยสามารถทดสอบได้ทั้งในหลอดแก้ว (In vitro) และในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (In vivo) รวมถึงการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) เพื่อให้มีความแน่ใจว่าวัสดุทางชีวภาพชนิดนั้นสามารถนำมาใช้ในร่างกายได้อย่างปลอดภัย จากนั้นภายหลังจากการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาต่อสภาพแวดล้อมทางชีวภาพเบื้องต้นแล้ว ในการศึกษาที่จะยืนยันว่าวัสดุใด ๆ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพหรือไม่นั้นจะต้องทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10993-1:2009 [2] ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับการทดสอบการกลายพันธุ์ของยีน ความเป็นพิษที่ส่งผลต่อร่างกายทั้งระบบ ความเป็นพิษในกรณีที่ได้รับประทานเข้าไป ความเป็นพิษต่อเซลล์ ความไวต่อปฏิกิริยา การแพ้ที่ก่อให้เกิดอาการคัน และการปลูกถ่ายในร่างกาย โดยในการศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาในหลอดแก้ว (In vitro study) ซึ่งเป็นการทดสอบในสภาวะจำลองภายในหลอดแก้วหรือภาชนะที่กำหนด โดยจะต้องทำทุกครั้งจนแน่ใจว่าไม่เป็นอันตรายแล้วจึงจะนำไปศึกษาในสัตว์ทดลอง โดยหลักการของการศึกษาวัสดุในหลอดแก้วนั้น คือ นำวัสดุมาไว้ในสภาวะจำลองทางชีวภาพของร่างกายในช่วงเวลาต่าง ๆ แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุทั้งทางกายภาพทางเคมี และลักษณะโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะต้องศึกษาผลที่เกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ และผลที่เกิดขึ้นในระยะยาว จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการทดลองในหลอดแก้วทั้งหมดมาวิเคราะห์และช่วยในการตัดสินใจว่าวัสดุดังกล่าวเหมาะที่จะนำไปใช้งานแล้วหรือไม่ และควรจะนำไปใช้งานประเภทใด ซึ่งเมื่อได้ผลที่แน่ชัดแล้วจึงจะสามารถนำไปศึกษาในสัตว์ทดลอง (In vivo study) ได้ต่อไป

ตารางที่ 1.1 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อ [3]

ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อ	ลักษณะการเกิด
เป็นพิษ (toxic)	เนื้อเยื่อตาย
ค่อนข้างเฉื่อย (nearly inert)	เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุ
ว่องไวทางชีวภาพ (bioactive)	มีพันธะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อผิวของวัสดุกับเนื้อเยื่อ
ละลายเมื่ออยู่ในร่างกาย (resorbable)	เนื้อเยื่อแทนที่วัสดุ

ทั้งนี้วัสดุในกลุ่มของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายนั้นก็มีการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว ซึ่งจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ งานวิจัยกลุ่มที่ 1 [4-6] จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการสังเคราะห์และประดิษฐ์วัสดุให้มีคุณภาพดีที่สุดสอดคล้องกับความต้องการนำไปใช้งาน โดยอัลลอย Co-Cr ที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายนั้นจะต้องมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ขององค์ประกอบสูงอีกทั้งยังต้องมีความหนาแน่นสูงมาก (high density) ด้วยเนื่องจากหากมีรูพรุนเกิดขึ้นภายในเนื้อสารจะส่งผลให้เกิดผลกระทบแบบกัลวานิก (galvanic effect) [7] หรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ ซึ่งเป็นผลจากการที่โลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ 2 ชนิดที่ต่างกันมาเชื่อมต่อกันและเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสอง เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าและถูกกัดกร่อนในที่สุด ส่วนงานวิจัยกลุ่มที่ 2 [8-10] จะเป็นการนำอัลลอย Co-Cr ที่ต้องการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกันมาทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพภายในหลอดทดลอง (In vitro study) โดยการนำวัสดุมาแช่ไว้ในสารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (SBF) เลือดและน้ำลายเทียม ที่มีสภาวะความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกันภายในเวลาที่กำหนด จากนั้นทำการศึกษาการปลดปล่อยของไอออนโลหะลงไปในของเหลวที่แช่ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและพื้นผิวนอกของวัสดุดังกล่าวด้วย จะเห็นว่าการที่จะได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องตั้งแต่เริ่มสังเคราะห์และประดิษฐ์วัสดุ ไปจนถึงการหาลักษณะเฉพาะและการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพทั้งหมดนั้นต้องใช้ระยะเวลามากทีเดียว

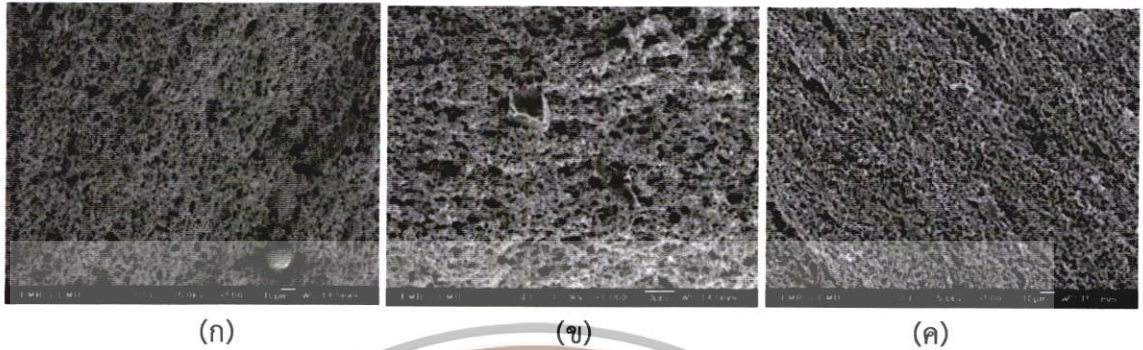
สำหรับงานวิจัยเบื้องต้นที่ผู้วิจัยได้ทดลองและศึกษาอยู่นั้นจะเป็นส่วนของความพยายามใช้เทคนิคการเตรียมสารแบบดั้งเดิมหรือที่เรียกว่ากรรมวิธีผง (powder metallurgy) มาเตรียมอัลลอยในระบบ Co-Cr ให้มีคุณภาพดีที่สุด โดยเริ่มจากการทดลองใช้เทคนิคการบดย่อยที่หลากหลาย ได้แก่ การบดด้วยครกหยก การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบแห้ง และการบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก เพื่อศึกษาความผสมกลมกลืนและเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 1.1 โดยจากรูปจะเห็นว่า การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก (รูปที่ 1.1(ค)) มีความสม่ำเสมอของเนื้อสารมากที่สุดจึงได้เลือกเทคนิคการบดย่อยนี้ไปทดลองต่อไป จากนั้นจะทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดแกนเดียว (uniaxial pressing) ตามด้วยการอัดด้วยแรงที่เท่ากันทุกทิศทาง (cold isostatic pressing) เพื่อต้องการให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดผลกระทบแบบกัลวานิก จากนั้นในขั้นตอนต่อไปจะต้องนำเม็ดอัดอัลลอยไปเผาผนึกเพื่อให้คงรูปแข็งและทรงตัวอยู่ได้เรียกว่าการซินเตอร์ (sintering) ซึ่งต้องกระทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะหรือสนิม ทั้งนี้การประดิษฐ์อัลลอยในส่วนนี้สามารถควบคุมได้ด้วยตัวแปรในระหว่างกระบวนการเตรียม ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการให้ความร้อน และอัตราการ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของโรงเรียนราชประชานุเคราะห์ 30 จังหวัดบุรีรัมย์ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากโรงเรียนราชประชานุเคราะห์ 30 จังหวัดบุรีรัมย์

This material is protected by copyright and/or related rights. All rights are reserved. No part of this document may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the copyright owner.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีที่สุดและใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุดนั่นเอง ซึ่งเมื่อได้ชิ้นงานที่พอใจแล้วจึงทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และลักษณะโครงสร้างจุลภาคต่อไป



รูปที่ 1.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอัลลอย  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  ที่เตรียมด้วยเทคนิคการบดย่อยแบบต่าง ๆ โดย (ก) การบดด้วยครกหยก (ข) การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบแห้ง และ (ค) การบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก

จากนั้นในขั้นตอนถัดไปจะต้องนำวัสดุที่เตรียมได้ไปทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพในหลอดแก้ว (*In vitro study*) โดยการนำเม็ดอัลลอย  $\text{Co-Cr}$  ที่ผ่านเงื่อนไขการเตรียมที่หลากหลายไปแช่ไว้ในสารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (SBF) เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน พร้อมกับศึกษาปริมาณของไอออนโลหะวาเลนต์ออกมาสู่ของเหลวภายนอกน้อยเพียงใด รวมถึงการตรวจสอบสภาพผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการใช้งานด้วย โดยจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมไม่ได้มีผลต่อปริมาณไอออนของโลหะที่หลุดออกมาเจือปนของของเหลว ดังเช่นงานวิจัยของ Lucchetti และคณะ [8] หรืองานวิจัยของ Kim และคณะ [9] ที่ได้นำอัลลอย  $\text{Co-Cr}$  ที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน เช่น การหล่อ (*casting*) การบดย่อย (*milling*) และการซินเตอร์ด้วยเลเซอร์ (*laser sintering*) มาตรวจสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยไอออนโลหะภายใต้สภาวะจำลองภายในช่องปาก โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นเมื่อนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ไว้ในสารละลายจำลองเป็นเวลานาน 30 วัน อัลลอย  $\text{Co-Cr}$  จะปลดปล่อยไอออนออกมาจำนวนหนึ่ง โดยงานวิจัยของ Lucchetti ได้รายงานว่าอัลลอยที่เตรียมด้วยเทคนิคการหล่อสามารถวัดปริมาณไอออนที่ปลดปล่อยได้ 4.964 ppm ในขณะที่ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยการบดย่อยและการซินเตอร์ด้วยเลเซอร์มีปริมาณไอออนเป็น 2.642 และ 2.351 ppm ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ Kim ก็แสดงผลงานวิจัยในทำนองเดียวกัน โดยสาเหตุที่ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีต่างกันมีปริมาณไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมาแตกต่างกันนั้นก็เพราะว่ามีลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความพรุนที่ต่างกันนั่นเองซึ่งก็เป็นผลโดยตรงจากตัวแปรในระหว่างการผลิต นอกจากนี้งานวิจัยทั้งสองกลุ่มนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยของสิ่งแวดล้อมด้วยโดยการทดสอบชิ้นงานภายใต้สภาวะความเป็นกรดเบสและมีค่า pH ที่แตกต่างกัน ซึ่ง

พบว่สภาวะที่เป็นกรดจะเหนี่ยวนำให้เกิดการกัดกร่อนได้ไวกว่า ทั้งนี้จากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is intended for educational use only. It is not allowed for commercial use. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ของเหลวคือลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นก็เป็นผลมาจาก การควบคุมตัวแปรในระหว่างกระบวนการเตรียมนั่นเอง ส่วนปัจจัยต่อมาก็คือสภาวะของสิ่งแวดล้อมที่ถูกนำไปใช้งาน อาทิเช่น ของเหลวในร่างกาย น้ำลาย หรือเลือด ที่มีค่า pH ต่างกัน ก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน

จากที่มาและเหตุผลที่กล่าวมาเบื้องต้นจะเห็นว่าการประดิษฐ์วัสดุในระบบ Co-Cr สำหรับนำไปใช้งานเป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายให้สำเร็จและได้มาตรฐานตามที่ตั้งไว้ พร้อมศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพตามขั้นตอนมาตรฐาน และการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้งานจริงนั้นมีความสำคัญมาก ซึ่งทางผู้วิจัยเชื่อว่าผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสังคมผู้สูงอายุในประเทศไทยได้มาก อีกทั้งองค์ความรู้ที่ได้รับก็จะถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการผลิตและพัฒนาวัสดุขั้นสูงสำหรับอุตสาหกรรมวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ในประเทศไทยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- (1) เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมให้สามารถประดิษฐ์อัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายที่มีศักยภาพสูง
- (2) เพื่อทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่เตรียมได้ด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอย่างเป็นระบบ
- (3) เพื่อสร้างฐานข้อมูลของการผลิตและสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เป็นฐาน รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยไอออนโลหะและเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมในการนำไปใช้งาน ซึ่งเชื่อว่าจะเป็นประโยชน์ในเชิงนโยบาย เชิงสาธารณะ หรือเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต อีกทั้งยังช่วยให้ผู้ที่สนใจได้นำองค์ความรู้ใหม่ที่ได้ไปใช้ประกอบการเรียนการสอนและการวิจัยแก่นักศึกษาทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องอีกด้วย
- (4) เพื่อตีพิมพ์ผลงานวิชาการในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติรวมทั้งการเสนอผลงานแก่นักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งจะช่วยเหลือเผยแพร่งานวิจัยออกไปสู่ในและต่างประเทศเพื่อประโยชน์ในการสร้างความเชื่อมโยงกับความร่วมมือระหว่างนักวิจัยในระดับชาติและนานาชาติ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมให้สามารถประดิษฐ์อัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายให้มีศักยภาพสูง โดยจะมุ่งเน้นไปที่การต่อยอดผลงานวิจัยที่ได้รับจากโครงการงานวิจัย วช. 60 โดยจะเลือกเงื่อนไขในการเตรียมที่ดีที่สุดมาปรับปรุงคุณภาพเพิ่มเติม ด้วยการเพิ่มขั้นตอนของการบำบัดทางความร้อน (heat treatment) เข้าไปเพื่อช่วยให้ผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบ (recrystalline) จากนั้น

จะทำการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible) ของอัลลอยนี้โดยละเอียดและเป็น

ระบบ โดยจะทำการแช่วัสดุอัลลอยที่เตรียมได้เป็นระยะเวลาแตกต่างกัน (3 7 15 และ 30 วัน) ภายใต้สารละลายจำลองของร่างกาย ได้แก่ สารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (SBF) โดยการทดสอบพฤติกรรมการแน่นตัว เฟสที่เกิดขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมด จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีอาร์คิมิดีส (Archimedes' method) เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ตามลำดับ ส่วนการตรวจสอบปริมาณไอออนโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมาของเหลวจะทดสอบด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (atomic absorption spectroscopy; AAS) และพื้นผิวของชิ้นงานภายหลังการแช่ในสารละลายจำลองของร่างกายจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope; AMF)

#### 1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ปี	กิจกรรม	ค.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
2561	1.ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2561	2. วิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนของผลงานวิจัย วช.ปี 60 จากนั้นจึงออกแบบการทดลองเพิ่มเติม	X	X										
2561	3. จัดเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์	X	X	X									
2561	4. ผลิตวัสดุในระบบ Co-Cr ภายใต้เงื่อนไขที่ปรับปรุงใหม่			X	X	X							
2562	5. นำวัสดุในระบบ Co-Cr มาบำบัดด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างผลึก				X	X	X						
2562	6. ตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น สมบัติกายภาพ ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาค ของสารในระบบ Co-Cr ที่ทำการปรับปรุงแล้ว					X	X						
2562	7. เตรียมสารละลายจำลองพลาสมาของเลือด (SBF) พร้อมเริ่มทดสอบกับวัสดุโดยการแช่ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด						X	X	X	X			
2562	8. ตรวจสอบการปลดปล่อยไอออนโลหะลงไปในของเหลวและพื้นผิวหน้าของวัสดุเมื่อผ่านการแช่ในของเหลวตามเวลาที่กำหนด								X	X	X		
2562	9. ทดสอบการปลดปล่อยไอออนโลหะและพื้นผิวหน้าของวัสดุ									X	X	X	
2562	10. อภิปรายผลการศึกษาและสรุปผลการวิจัย ตลอดจนข้อเสนอแนะ พร้อมสรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง										X	X	X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีการขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนนำเอกสารไปใช้

This material is copyright for educational use only. It is not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ได้ชิ้นงานต้นแบบของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายที่มีศักยภาพสูงและเตรียมด้วยกระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำ
- (2) ได้ทราบข้อมูลความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่เตรียมด้วยกระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมและสามารถเทียบเคียงศักยภาพกับวัสดุราคาแพงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ
- (3) ได้เพิ่มพูนความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยไอออนโลหะและเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมในการนำไปใช้งานของวัสดุที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เป็นฐาน ซึ่งคาดว่าข้อมูลเหล่านี้จะมีบทบาทสำคัญในการเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ และให้สามารถออกแบบให้วัสดุในระบบนี้สามารถแสดงประสิทธิภาพออกมาได้อย่างเต็มที่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ ใช้งานได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังช่วยชี้แนะแนวทางในการทำวิจัยและพัฒนาต่อไปอีกด้วย
- (4) เกิดองค์ความรู้ใหม่ซึ่งเป็นประโยชน์ในเชิงวิชาการ อีกทั้งยังได้แนวทางการผลิตอัลลอยของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่มีคุณภาพสูงด้วยเทคนิคแบบดั้งเดิมซึ่งไม่ได้เพิ่มภาระค่าใช้จ่ายให้สูงขึ้น จึงเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการลดต้นทุนการผลิตและลดการนำเข้าจากต่างประเทศด้วย
- (5) ได้สร้างองค์ความรู้พื้นฐานให้กับหน่วยงานและบุคลากรของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งจะได้เตรียมความพร้อมและพัฒนาทั้งบุคลากรและหน่วยงานให้คุ้นเคยและเข้าใจงานวิจัยนี้และปรับระดับคุณภาพให้เป็นที่ยอมรับทั้งในระดับชาติและนานาชาติได้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนวงการอุตสาหกรรมในประเทศให้มีความก้าวหน้าทัดเทียมนานาชาติ
- (6) สามารถนำเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการ และตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในวารสารทางวิชาการระดับ ชาติและนานาชาติ รวมถึงการจดสิทธิบัตร เพื่อเป็นกรณีศึกษาและข้อมูลสำหรับนักเรียน นักศึกษา บุคลากรรุ่นใหม่ และผู้ที่สนใจในการศึกษาค้นคว้าต่อไป

### 1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ได้รับชิ้นงานต้นแบบของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายที่มีศักยภาพสูงและเตรียมด้วยกระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำ
- (2) ได้ทราบข้อมูลความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่เตรียมด้วยกระบวนการผลิตวัสดุแบบดั้งเดิมและสามารถเทียบเคียงศักยภาพกับวัสดุราคาแพงที่นำเข้าจากต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการหรือฝ่ายวิจัยที่มีอำนาจนำใส่

This material is for personal use only. It is not to be used for any other purpose without the prior written consent of the copyright holder.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- (3) เผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ที่ได้รับในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีชื่อปรากฏอยู่ใน SCOPUS หรือ SJR หรือ ISI จำนวนไม่น้อยกว่า 1 เรื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยนี้ต้องแจ้งให้หน่วยงานต้นสังกัดของนักวิจัยทราบก่อนใช้  
This material is reserved for educational use only. It is not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### ทฤษฎี สมมุติฐาน กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องของอัลลอยในระบบโคบอลต์-โครเมียม สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย จากนั้นในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

องค์การสหประชาชาติได้ระบุไว้ว่าประเทศใดมีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปในสัดส่วนเกินร้อยละ 10 ของประชากรทั้งประเทศ ถือว่าประเทศนั้นก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ หรือ aging society และจะเป็นสังคมผู้สูงอายุเต็มรูปแบบ (aged society) เมื่อสัดส่วนประชากรที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 โดยตัวเลขของประเทศไทย โดยที่เมื่อสิ้นปี พ.ศ. 2558 จำนวนประชากรในประเทศไทย อยู่ที่ 65,203,979 คน เป็นผู้ที่อายุ 60 ปีขึ้นไป 10,569,021 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 16.2 ของประชากรทั้งหมด นั่นหมายความว่าประเทศไทยก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแล้ว และคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2564 ไทยจะเข้าสู่สังคมประชากรสูงวัยแบบสมบูรณ์โดยมีผู้ที่มีอายุมากกว่า 60 ปี เกิน 20% ของจำนวนประชากรทั้งหมด [11] โดยข้อมูลของสถาบันวิจัยประชากรและสังคม มหาวิทยาลัยมหิดล [12] ได้ระบุไว้ว่าประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุเมื่อ 10 ปีก่อน ซึ่งในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีประชากรจำนวน 62,200,000 คน โดยมีผู้สูงอายุ 10 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนประชากรทั้งหมดหรือคิดเป็นจำนวน 6,220,000 คน ที่ไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุโดยมีสัดส่วนของวัยทำงานที่ต้องดูแลต่อจำนวนผู้สูงอายุราว 6-7 คน ต่อการดูแลผู้สูงอายุ 1 คน สำหรับในปี พ.ศ. 2558 นั้นประเทศไทยมีเปอร์เซ็นต์ของผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 9 ล้านคน ซึ่งถือได้ว่าจำนวนผู้สูงอายุได้เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้สูงอายุทั้งหมดในปี พ.ศ. 2548 โดยมีสัดส่วนวัยทำงานที่ดูแลผู้สูงอายุ ลดลงเป็น 5 คน ต่อการดูแลผู้สูงอายุ 1 คน โดยในปี พ.ศ. 2568 หรือในอีก 10 ปีข้างหน้า คาดว่าประเทศไทยจะมีผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็น 19.8 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 13 ล้านคน และมีสัดส่วนวัยทำงาน 3 คนต่อการดูแลผู้สูงอายุ 1 คน ซึ่งหากว่าประเทศไทยในปี พ.ศ. 2568 เป็นไปตามที่คาดไว้ นั่นก็จะถือว่าประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ จากนั้นในปี พ.ศ. 2578 ก็คาดว่าประเทศไทยจะมีผู้สูงอายุราว 25.1% ของจำนวนประชากรทั้งหมดหรือประมาณ 16 ล้านคน ซึ่งมีสัดส่วนวัยทำงาน 2 คน ต่อการดูแลผู้สูงอายุ 1 คน ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีจำนวนประชากรผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นทุกปี และผู้สูงอายุกลุ่มนี้เป็นวัยที่มีโรคภัยไข้เจ็บและความเสื่อมโทรมในร่างกายให้เห็นทุกวัน โดยปัญหาที่พบได้บ่อยในกลุ่มผู้สูงอายุนั้นก็คือการเสื่อมโทรมของอวัยวะ

ประเภทข้อต่อ หัวเข่า ข้อต่อสะโพก และฟัน เป็นต้น ซึ่งวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพสูงวิธีหนึ่งนั้นก็ คือการเปลี่ยนมาใช้อวัยวะเทียมทดแทนอวัยวะจริงที่เสื่อมโทรมไป ทั้งนี้อวัยวะเทียมแบบฝังใน

This material is prepared for educational use only. Not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ร่างกายส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลมีค่าสูงมากดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการสรุปค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเทียมแต่ละชิ้น

ตารางที่ 2.1 ราคาค่าใช้จ่ายของการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกาย [13, 14]

ตัวอย่างอวัยวะเทียม ที่ฝังในร่างกาย	ราคาค่าใช้จ่าย	
	ราคาเฉพาะชิ้นส่วน (ต่อชิ้น)	ค่ารักษาพยาบาลทั้งหมด
ข้อหัวเข่าเทียม	116,202 บาท	360,000 บาท
ข้อสะโพกเทียม	150,000 บาท	623,000 บาท
สะพานฟัน	3,500 บาท คิดเพิ่มซี่ละ 500 บาท	-

นอกจากนี้ยังมีประชากรอีกกลุ่มที่มักจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเทียมนั้นก็คือพวกนักกีฬาในประเภทที่ต้องใช้หัวเข่าใช้การรับน้ำหนักหรือจะเป็นแรงกระแทกจากการวิ่งฝึกซ้อมอย่างหนัก การปะทะหนักภายในการแข่งขัน เช่น ฟุตบอล หรือ บาสเก็ตบอล เป็นต้น ทั้งสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอวัยวะเทียมสูงมากนั้นก็คือนำเข้าวัสดุจากต่างประเทศเนื่องจากในประเทศยังไม่มีผู้ประกอบการรายใดลงทุนในอุตสาหกรรมนี้ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่มีต้นทุนที่สูงมากอาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน อีกทั้งอวัยวะเทียมแต่ละชิ้นจะต้องผลิตให้เหมาะสมกับแต่ละบุคคลจึงไม่สามารถผลิตคราวละมาก ๆ ได้จึงยังทำให้มีต้นทุนที่สูงขึ้นไปอีก อย่างไรก็ตามในการศึกษาการสังเคราะห์และประดิษฐ์วัสดุสำหรับทำเป็นอวัยวะเทียมนั้นก็ถือว่าเป็นการเริ่มต้นที่ดีสำหรับอุตสาหกรรมอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายในประเทศไทย โดยโครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาวัสดุในกลุ่มอัลลอยของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ยอดเยี่ยม สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี และไม่เป็นที่พิษกับร่างกาย [15] โดยอัลลอยโคบอลต์ – โครเมียม (Co-Cr) จัดเป็นโลหะผสมฐานโลหะเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ โดยส่วนใหญ่จะใช้งานในด้านการทำกระดูกและฟัน ในทางทันตกรรมมักใช้สำหรับผลิตกรอบโลหะของฟันปลอมบางส่วนที่สามารถถอดออกได้ ซึ่งอัลลอย Co-Cr นี้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง มีค่าความแข็งที่สูงที่มีความคล้ายคลึงกับสแตนเลส มีความต้านทานแรงดึงที่สูง และมีความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่ออยู่ในที่มีอุณหภูมิสูง

โดยทั่วไปอัลลอยของโลหะที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามองค์ประกอบฐานและการนำไปใช้งาน ได้แก่ (1) อัลลอยของไทเทเนียม (Ti based alloys) (2) อัลลอยของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr based alloys) และเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และ (3) อัลลอยของแมกนีเซียม (Mg based alloys) ซึ่งทั้งสามกลุ่มล้วนแล้วแต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมแต่จะมีข้อดีและข้อจำกัดในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่

2.1 ซึ่งแสดงความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อนของวัสดุแต่ละชนิด ทั้งนี้ปัญหาหลักของการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

This material is for personal use only. It is not to be distributed, modified, or used for any other purpose without the permission of the copyright holder.

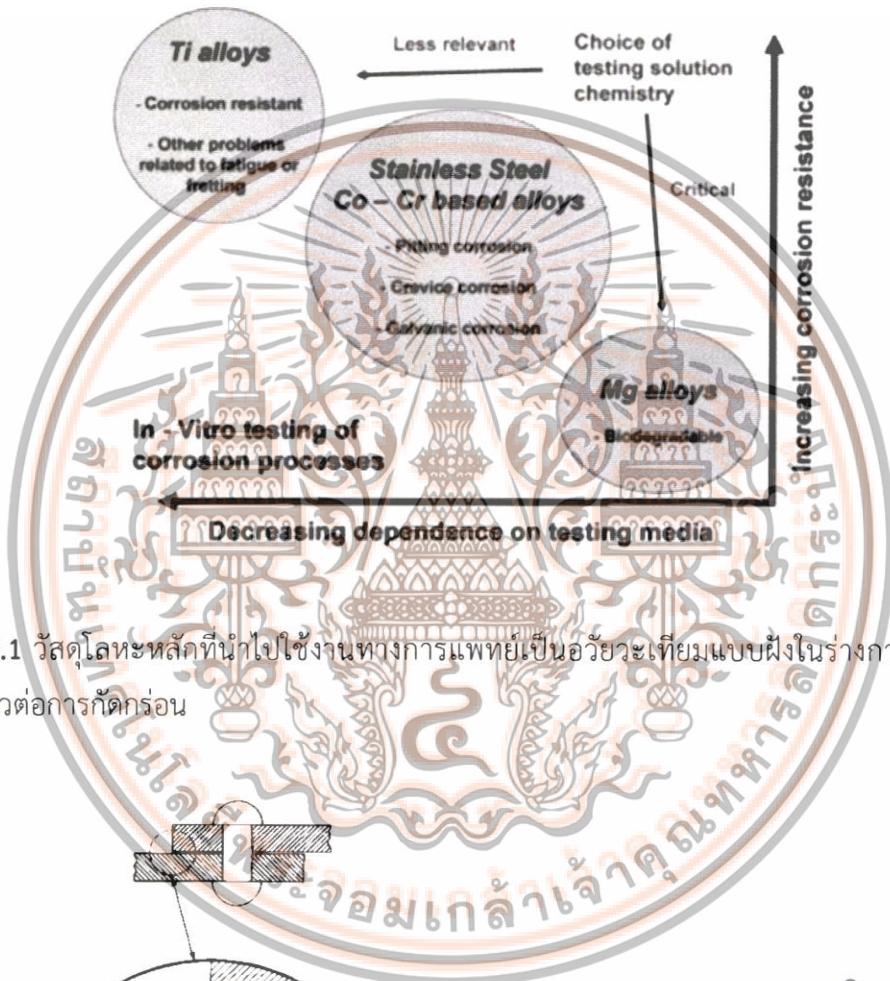
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

งานประเภทนี้คือความทนทานและอายุการใช้งานภายในร่างกาย ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากการกัดกร่อน (corrosion) ในระหว่างการใช้นั่นเอง ทั้งนี้วิธีแก้ปัญหาในระยะยาวคือจะต้องทดสอบวัสดุภายใต้บรรยากาศที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงซึ่งก็คือการทดลองในสิ่งมีชีวิต (*In vivo study*) ได้แก่ คน หรือ สัตว์ จึงจะได้ข้อมูลที่ชัดเจนที่สุด ทั้งนี้การเฝ้าสังเกตกระบวนการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งมีชีวิต นั้นทำได้ยากมากและไม่ได้รับข้อมูลที่ตรงไปตรงมา จึงทำให้การทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุมักจะ ทำภายในขวดแก้ว (*In vitro study*) มากกว่าซึ่งสามารถเฝ้าสังเกตได้ง่ายกว่าและได้รับข้อมูลทางตรง เลย ทั้งนี้ปัญหาหลักของการศึกษาในหลอดแก้วนั้นก็คือการเลือกของเหลวตัวกลางที่มีความซับซ้อน ขององค์ประกอบและประกอบด้วยโปรตีนและเซลล์ที่เหมาะสม รวมไปถึงเงื่อนไขของอุณหภูมิและ บรรยากาศ (ปริมาณ  $O_2$  หรือ  $CO_2$ ) ที่เหมาะสมกับการใช้งานด้วย โดยอัลลอยของไทยเทเนียมถือได้ว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีที่สุด สามารถทนได้ดีในของเหลวทุกประเภท จึงทำให้ไม่มี ข้อจำกัดในการนำไปใช้งานมากนัก แต่ก็เป็วัสดุที่มีราคาสูงมากที่สุด ส่วนอัลลอยของแมกนีเซียมนั้น ไวต่อกรเกิดปฏิกิริยามากจึงนิยมนำไปใช้งานเป็นอวัยวะเทียมในส่วนที่ทำการรักษาชั่วคราว เช่น การ เชื่อมกระดูกหรือกระดูก โดยไม่ต้องทำการผ่าตัดเอาวัสดุเชื่อมออกแล้วแต่จะให้เสื่อมสลายไปใน ร่างกายเลย (*degradable implants*) ซึ่งกลุ่มนี้จะมีข้อจำกัดของสภาพของเหลวที่ใช้งาน ค่อนข้างมากเนื่องจากจะอัลลอยจะต้องสามารถอยู่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและนานพอโดยไม่ สลายไปก่อนเวลาอันควร สำหรับกลุ่มของอัลลอยของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr based alloys) และเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) จัดว่าเป็นกลุ่มที่ได้รับความนิยมนำไปใช้งานมากที่สุดใน ปัจจุบันเนื่องจากสามารถใช้ในเงื่อนไขของเหลวตัวกลางที่หลากหลายและมีราคาถูกกว่ากลุ่มอัลลอย ไทยเทเนียม อย่างไรก็ตามปัญหาด้านการกัดกร่อนของวัสดุกลุ่มนี้ที่พบบ่อยนั้นก็คือการกัดกร่อนแบบ crevice หรือ การกัดกร่อนตามซอก ร่อง หรือมุมแหลม ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากรูปร่างของวัสดุฝังในที่ นำไปใช้งานในร่างกาย และการกัดกร่อนแบบ galvanic ซึ่งเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ ที่เป็นโลหะมากกว่า 2 ชนิดทำให้เกิดความแตกต่างของประจุไฟฟ้า ซึ่งการกัดกร่อนทั้งสองแบบนี้เป็น เหตุผลหลักที่ทำให้อัลลอยกลุ่มนี้เสื่อมสภาพลงและใช้งานได้ในเวลาจำกัด

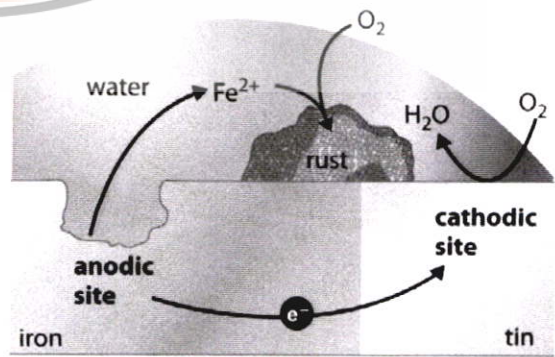
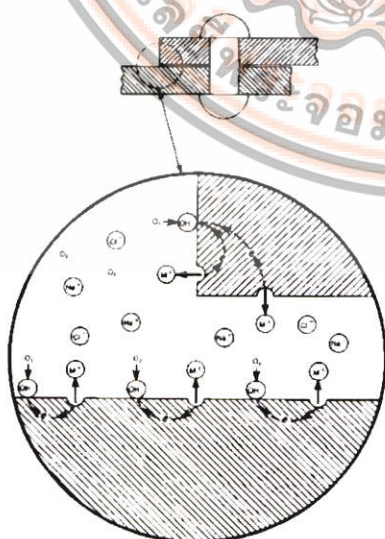
การทดสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุ (corrosion resistance) ถือว่าเป็นการ ทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ของวัสดุชนิดหนึ่งซึ่งการศึกษาในหลอดแก้ว (*In vitro*) จะสามารถเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการกัดกร่อนของของเหลวกับวัสดุได้ดีกว่า โดยหลักการคือ นำวัสดุมาไว้ในของเหลวที่แสดงสถานะจำลองทางชีวภาพของร่างกายในช่วงเวลาต่าง ๆ จากนั้นจึงนำ วัสดุมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค ในขณะเดียวกัน ของเหลวที่แสดงสถานะจำลองทางชีวภาพของร่างกายก็จะถูกนำไปทดสอบหาปริมาณของสารตกค้าง และไอออนของโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมาด้วย ซึ่งปริมาณสารตกค้างและไอออนของโลหะจะต้อง อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ วัสดุดังกล่าวจึงจะถือว่ามีความปลอดภัยและมีความเข้ากันได้ทาง ชีวภาพที่ดี จากการศึกษาหลักการในการเกิดการกัดกร่อนแบบ crevice และ galvanic นั้นพบว่า มี

ลักษณะคล้ายกันแต่การกัดกร่อนแบบ galvanic จะเกิดบริเวณรอยต่อของโลหะสองชนิด (หรือ

มากกว่า) ในสิ่งแวดล้อมเดียวกัน ส่วนการกัดกร่อนแบบ crevice จะเกิดที่วัสดุชนิดเดียวแต่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ต่างกันสองแบบ (หรือมากกว่า) ซึ่งหากพิจารณาถึงการนำวัสดุอัลลอยไปใช้งานเป็นวัสดุเทียมแบบฝังในร่างกายแล้วคาดว่ากรกัดกร่อนแบบ galvanic น่าจะเป็นผลของความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบในเนื้อวัสดุหรืออัลลอย (เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของเนื้อสาร) ส่วนการกัดกร่อนแบบ crevice น่าจะเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของสิ่งแวดล้อมที่ใช้งานซึ่งก็คือสภาวะของเหลวที่จำลองสภาวะทางชีวภาพของร่างกาย อุณหภูมิ และค่า pH นั้นเอง



รูปที่ 2.1 วัสดุโลหะหลักที่นำไปใช้งานทางการแพทย์เป็นอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายและความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองและตัวอย่างการเกิดการกัดกร่อนแบบ (ก) crevice และ (ข) galvanic

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามเอื้อกริที่พจนานุกรมฉบับนี้เพื่อการค้าหรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
This material is reserved for educational use only and not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้นกรอบแนวคิดและสมมติฐานของโครงการวิจัยนี้คือ การควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้น และลักษณะโครงสร้างของวัสดุอัลลอยที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกายผ่านกระบวนการผลิตเพื่อให้วัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงโดยมุ่งเป้าหมายไปที่การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนแบบ galvanic พร้อมกันนั้นก็ทำการศึกษามวลของสิ่งแวดล้อมของของเหลวที่แสดงสภาวะจำลองทางชีวภาพของร่างกายในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยมุ่งเป้าหมายไปที่การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบ crevice ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าหากเข้าใจพฤติกรรมการกัดกร่อนแต่ละแบบก็จะสามารถทำนาย ออกแบบ และควบคุมลักษณะโครงสร้างจุลภาควรรวมถึงการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ในการนำไปใช้งานทางการแพทย์โดยเฉพาะอวัยวะเทียมแบบฝังในร่างกายนั้นจะนิยมเลือกใช้อัลลอย Co-Cr ในสัดส่วนที่มีปริมาณของโคบอลต์มากกว่า (Co-rich) เนื่องจากในบริเวณสัดส่วนนั้นนอกจากจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมแล้วยังมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่โดดเด่นอีกด้วย โดยนักวิจัยส่วนหนึ่งได้ให้ความสนใจศึกษาการนำอัลลอย Co-Cr ไปใช้งานทางทันตกรรมพร้อมกับศึกษาความเป็นพิษต่อร่างกาย ดังเช่นงานวิจัยของ M.C. Lucchetti และคณะ [8] ที่ได้นำอัลลอย Co-Cr ที่ผ่านกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ การหล่อ (casting) การบดย่อย (milling) และการซินเตอร์ด้วยเลเซอร์ (laser - sintering) มาตรวจสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยไอออนโลหะภายใต้สภาวะจำลองภายในช่องปาก โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ไว้ในสารละลายจำลองเป็นเวลานาน 30 วัน อัลลอยโคบอลต์-โครเมียมจะปลดปล่อยไอออนออกมาจำนวนหนึ่ง โดยชิ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยเทคนิคการหล่อสามารถวัดปริมาณไอออนที่ปลดปล่อยได้ 4.964 ppm ในขณะที่ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยการบดย่อยและการซินเตอร์ด้วยเลเซอร์มีปริมาณไอออนเป็น 2.642 และ 2.351 ppm ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีต่างกันมีปริมาณไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมาแตกต่างกันนั้นก็เพราะว่ามีลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความพรุนแตกต่างกันซึ่งก็เป็นผลโดยตรงจากตัวแปรในระหว่างการผลิตนั่นเอง นอกจากนี้กลุ่มวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของค่า pH ของของเหลวตัวกลางที่มีต่อปริมาณไอออนที่หลุดออกมาจากอัลลอยแต่ละแบบด้วย โดยได้เลือกใช้ของเหลวที่มีสภาพความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำลายเทียม (artificial saliva) ค่า pH เท่ากับ 2.3 สารละลายน้ำเกลือ (saline solution) ความเข้มข้น 6.5% และ 0.9% ที่มีค่า pH เท่ากับ 7.1 โดยทำการแช่ทิ้งไว้เป็นเวลานาน 15 และ 30 วัน จากนั้นจึงทดสอบหาปริมาณไอออนในของเหลวแต่ละตัว โดยจากผลการทดลองพบว่าในบรรยากาศที่มีความเป็นกรดมากกว่าจะมีความเสี่ยงต่อการเจือปนของไอออนโลหะมากกว่า จากนั้นในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบการกัดกร่อนทางชีวภาพ (biocorrosion test) โดยการเติมแบคทีเรียที่ชื่อ *Eikenella corrodens* แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจำลองสภาวะร่างกายเป็นเวลานาน 30 วัน ซึ่งเมื่อทดสอบผลที่ได้พบว่าไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหรือเปลี่ยนแปลงใด ๆ เลยแม้เวลาจะผ่านไปหลายวัน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามการเผยแพร่โดยไม่อนุญาตในทางใด ๆ ภายใต้งานวิชาการค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามใช้เพื่อการค้าหรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

This material is for personal use only. All rights reserved. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คณะวิจัยนี้ได้สรุปในตอนท้ายว่าอัลลอย Co-Cr ที่เตรียมได้จากทุกวิธีมีความทนทานต่อการกัดกร่อนพอสมควรและเหมาะสมเพียงพอที่จะสามารถใช้งานได้ในทางทันตกรรม (dental usage)

Kim และคณะ [9] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพในหลอดแก้วของอัลลอย Co-Cr สองชนิดที่เตรียมด้วยวิธีแตกต่างกันคือวิธีบดย่อยแบบใหม่ร่วมกับการชินเตอร์และวิธีหล่อแบบดั้งเดิม โดยได้ทำการทดสอบไอออนของโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมาในน้ำลายเทียมที่มีค่า pH เท่ากับ 5.3 และ 2.3 ตามลำดับ พร้อมกันนี้ยังได้ทำการแช่อัลลอย Co-Cr ไว้ในตัวกลางเซลล์เพาะเลี้ยง (cell culture medium) เป็นเวลานาน 1, 3 และ 7 วัน ด้วยเพื่อศึกษาผลการกัดกร่อนทางชีววิทยา ซึ่งในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยที่เตรียมโดยทั้งสองวิธีพบว่าอัลลอยที่เตรียมด้วยเทคนิคบดย่อยแบบใหม่ร่วมกับการชินเตอร์ให้เกรนที่มีขนาดเล็กละเอียดมากกว่าและมีเฟส  $\gamma$ -hcp โดดเด่นกว่า และเมื่อตรวจสอบปริมาณไอออนโลหะในตัวกลางก็พบว่าอัลลอยที่เตรียมด้วยวิธีบดย่อยแบบใหม่ร่วมกับการชินเตอร์มีปริมาณไอออนของโคบอลต์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาน้อยกว่าอัลลอยที่เตรียมด้วยวิธีหล่อแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยยะสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ส่วนสัญญาณวิทยาของเซลล์เพาะเลี้ยงมีลักษณะปกติทั้งสองกลุ่ม แต่ความอยู่รอดของเซลล์ (cell viability) ในชุดทดลองของอัลลอยที่เตรียมด้วยวิธีบดย่อยแบบใหม่ร่วมกับการชินเตอร์มีปริมาณมากกว่าชุดทดลองของอัลลอยที่เตรียมด้วยวิธีหล่อแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยยะสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ซึ่งคณะวิจัยนี้ก็สรุปไว้ว่าอัลลอย Co-Cr ที่เตรียมด้วยวิธีบดย่อยแบบใหม่ร่วมกับการชินเตอร์มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพในหลอดแก้วที่ดีกว่าอัลลอย Co-Cr ที่เตรียมด้วยวิธีหล่อแบบดั้งเดิม

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าเทคนิคในการเตรียมส่งผลต่อลักษณะสัญญาณวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปยังความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีและชีวภาพอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ปัจจัยของของเหลวที่จำลองสภาวะของร่างกายก็มีผลอย่างมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาก็ยังไม่ได้อธิบายอย่างชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของลักษณะสัญญาณวิทยาและโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุโดยตรง ซึ่งผู้วิจัยจะนำจุดต่อในส่วนนี้มาพัฒนาและอธิบายด้วยศาสตร์ของวัสดุซึ่งจะทำการโยงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเตรียม โครงสร้างจุลภาค สมบัติ และประสิทธิภาพตามหลักจตุรมุขของวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม (tetrahedron of materials science and engineer) โดยเชื่อว่าข้อมูลที่ได้อาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจมาก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง สารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย ขั้นตอนการเตรียมผง และกระบวนการเตรียมอัลลอยในระบบโคบอลต์-โครเมียม รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

โครงการวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการนำผลการวิจัยที่ได้รับจากการประดิษฐ์วัสดุที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) เป็นฐานด้วยวิธีการดั้งเดิมที่เตรียมได้จากโครงการวิจัย วช. 60 มาวิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนจากนั้นจึงออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขจุดอ่อนและเสริมจุดแข็งของชิ้นวัสดุที่ได้รับ โดยการปรับปรุงเงื่อนไขที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเตรียมเพิ่มเติม จากนั้นนำชิ้นงานไปบำบัดด้วยความร้อน (heat treatment) ภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อช่วยระบายความเค้น (stress relief) ภายในเนื้องาน และให้ผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (recrystalline) แล้วจึงทดสอบสมบัติและหาลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องต่อไป โดยการดำเนินงานในส่วนนี้จะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงชิ้นงานเดิมให้มีคุณลักษณะสอดคล้องกับชิ้นงานทางการค้าให้มากที่สุด

จากนั้นส่วนที่ 2 จะทำการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของชิ้นงานที่เตรียมได้จากในช่วงแรก โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (stimulated body fluid; SBF) ซึ่งสารละลาย SBF นี้เป็นสารละลายที่ผสมขึ้นมาให้มีปริมาณความเข้มข้นของไอออนที่ใกล้เคียงกับพลาสมาในเลือดของมนุษย์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบความเป็นไบโอแอคทีวิตี (bioactivity) ของวัสดุที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยมีความเข้มข้นของไอออนใกล้เคียงกับพลาสมาในเลือดตั้งเปรียบเทียบกับตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แสดงสารเคมีและปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF นี้ จากนั้นจึงนำวัสดุอัลลอยในระบบ Co-Cr มาแช่ทิ้งไว้สารละลาย SBF เป็นระยะเวลาตามแตกต่างกัน ได้แก่ 3 วัน 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิและค่า pH ให้คงที่ด้วย จากนั้นเมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจะนำสารละลาย SBF มาทดสอบปริมาณไอออนโลหะที่มีอยู่ในของเหลวแต่ละชนิดพร้อมตรวจสอบพื้นผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังจากที่ทดสอบตามเวลาที่กำหนด จากนั้นจะทำการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมมาทดสอบการปลดปล่อยไอออนโลหะของวัสดุต่อไป

ตารางที่ 3.1 สรุปลความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย SBF ชนิดต่าง ๆ เทียบกับพลาสมาของเลือด [16]

ไอออน	ความเข้มข้น (mM)				
	พลาสมา	c-SBF	r-SBF	i-SBF	m-SBF
Na <sup>+</sup>	142.0	142.0	142.0	142.0	142.0
K <sup>+</sup>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Mg <sup>2+</sup>	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5
Ca <sup>2+</sup>	2.5	2.5	2.5	1.6	2.5
Cl <sup>-</sup>	103.0	147.8	103.0	103.0	103.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	27.0	4.2	27.0	27.0	10.0
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายจำลองพลาสมาของเลือด [16]

สารเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	ปริมาณที่ใช้
NaCl	99.5	8.036 กรัม
NaHCO <sub>3</sub>	99.5	0.352 กรัม
KCl	99.5	0.225 กรัม
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	99.0	0.230 กรัม
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	98.0	0.311 กรัม
1.0 M-HCl	-	40 มิลลิลิตร
CaCl <sub>2</sub>	95.0	0.293 กรัม
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	99.0	0.072 กรัม
Tris(hydroxylmethyl)-aminomethane	99.9	6.063 กรัม
1.0 M-HCl	-	≈ 0.2 มิลลิลิตร

ทั้งนี้ในกระบวนการทดลองทั้งหมด ได้แก่ การเตรียมชิ้นงาน การทดสอบผล และการวิเคราะห์ข้อมูล จะทำที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้เอกสารนี้จะต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานที่ผิดและต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีอำนาจแก้ไข

This material is copyright of the author and is intended for personal use only. It is not to be used for commercial purposes. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 สารเคมีที่ใช้

- 3.2.1 ผงโคบอลต์ (Co)
- 3.2.2 ผงโครเมียม (Cr)
- 3.2.3 เอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) ความบริสุทธิ์ 95 %
- 3.2.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)
- 3.2.5 น้ำปราศจากไอออน (DI water)
- 3.2.6 ผงอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- 3.2.7 ก๊าซอาร์กอน (Ar)
- 3.2.8 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 3.2.9 ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)
- 3.2.10 แมกนีเซียม (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O)
- 3.2.11 แคลเซียม (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O)
- 3.2.12 ไดโซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- 3.2.13 กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (1.0 M-HCl)
- 3.2.14 โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
- 3.2.15 โซเดียมไฮโดรคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>)
- 3.2.16 Tris(hydroxymethyl)-aminomethane

### 3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)
- 3.3.2 เครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 0.0001 กรัม
- 3.3.3 เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน
- 3.3.4 ตู้อบสารอุณหภูมิ 80°ซ
- 3.3.5 เครื่องบดย่อยผสมสารด้วยลูกบอล (ball-milling)
- 3.3.6 เครื่องอัดแบบแกนเดี่ยวด้วยระบบไฮดรอลิกร่วมกับการให้ความร้อน (hot pressing)
- 3.3.7 ขวดพลาสติกพร้อมฝาปิด
- 3.3.8 เทปพันท่อน้ำ
- 3.3.9 ลูกบดทำจากเซอร์โคเนีย (ZrO<sub>2</sub>) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร
- 3.3.10 ซ้อนตักสาร
- 3.3.11 คีมคีบ (forceps)
- 3.3.12 กระดาษฟอยล์
- 3.3.13 ครกหยกสำหรับบดสาร (mortar)
- 3.3.14 เต้าไฟฟ้าสำหรับเผาสารที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่จะขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อน

This material is for educational purposes only. It is not allowed for commercial use without the permission of the copyright holder.

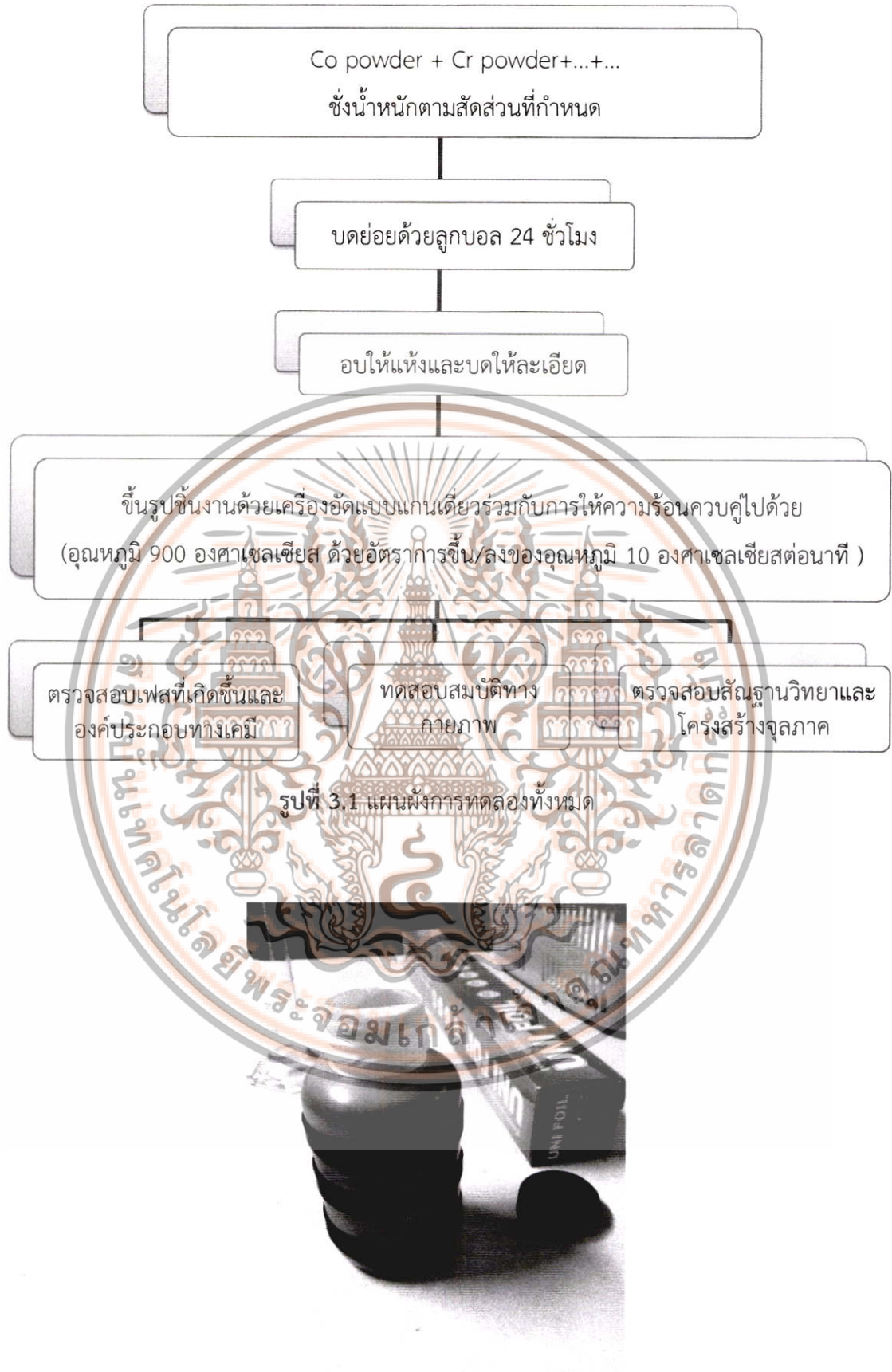
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 3.3.15 ถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร (alumina crucible)
- 3.3.16 ถุงซีปล็อคสำหรับเก็บชิ้นงาน
- 3.3.17 ตู้อุดความชื้น
- 3.3.18 ปีกเกอร์
- 3.3.19 เวอร์เนียร์คาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)
- 3.3.20 กระจกทราย
- 3.3.21 ขวดฉีดเอทานอล
- 3.3.22 กระจกทึบ
- 3.3.23 หลอดหยดสาร (dropper)
- 3.3.24 ตะแกรงร่อน
- 3.3.25 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร

### 3.4 กระบวนการเตรียมผงโคบอลต์ – โครเมียม (Co - Cr)

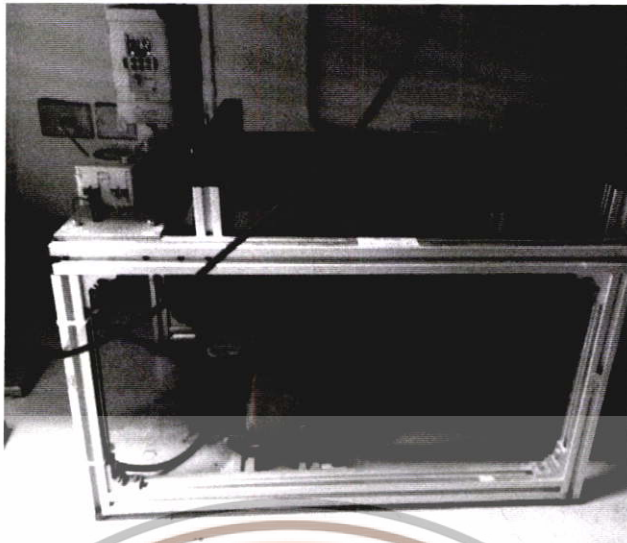
ในการเตรียมเม็ดอัลลอยโคบอลต์ – โครเมียม (Co - Cr) เริ่มจากการนำผงโคบอลต์ (Co) และผงโครเมียม (Cr) มาผสมกันด้วยเทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling) แบบดั้งเดิมโดยขั้นตอนทั้งหมดแสดงไว้ตามแผนผังการเตรียมในรูปที่ 3.1 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นตัวอย่างให้มีความเหมาะสมกับระดับห้องปฏิบัติการมากยิ่งขึ้นโดยเลียนแบบสัดส่วนองค์ประกอบจากวัสดุทางการค้าบางส่วนโดยให้มีสัดส่วนองค์ประกอบเป็น 70Co-30Cr 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W และ 35Co-35Ni-20Cr-10Mo ตามลำดับ

โดยเมื่อซังสารในแต่ละสัดส่วนตามที่กำหนดไว้แล้วจะเทสารลงในขวดพลาสติกดังรูปที่ 3.2 แล้วเติมเอทานอลให้ปริมาณถึงคอขวดที่พอเหมาะสมแล้วปิดฝาขวดพลาสติกพร้อมปิดผนึกด้วยเทปพันท่อน้ำให้สนิทแล้วนำไปวางบนเครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล (ball - milling) ดังรูปที่ 3.3 เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำสารที่ผสมกันมาล้างเพื่อทำการแยกสารที่ต้องการออกมาจากเม็ดบด แล้วนำไปอบตู้อบดังรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิ 80 °ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการระเหยเอทานอลออกไป จากนั้นเมื่อแห้งสนิทแล้วจึงนำมาบดให้ละเอียดด้วยครกหยกดังรูปที่ 3.5 ซึ่งก็จะได้ผงของอัลลอยโคบอลต์ – โครเมียม (Co - Cr) ในสัดส่วนต่างๆ ซึ่งมีลักษณะภายนอกที่คล้ายคลึงกันคือมีสีกึ่งเทาดำดังแสดงในรูปที่ 3.5 เช่นกัน



รูปที่ 3.2 ขวดพลาสติกผสมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
This material is reserved for educational use only. It is not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

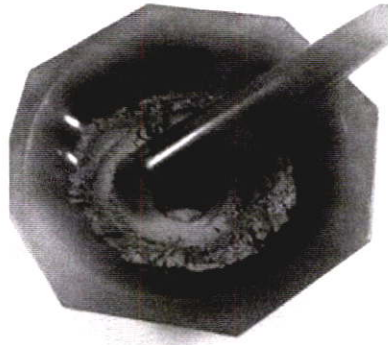


รูปที่ 3.3 เครื่องบดขยอยด้วยลูกบอล (ball - milling)



รูปที่ 3.4 ตู้อบสาร

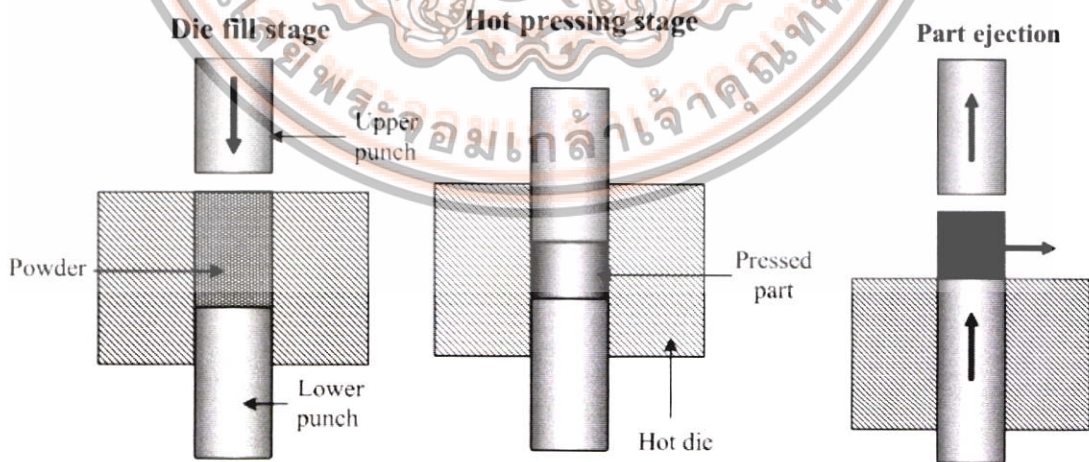
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในอำนาจของนักศึกษาใช้จริงที่มีคำนำใส่ใช้  
 This material is reserved for educational use only. All rights reserved for all parties who use it.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 ครกหยกบดสาร

### 3.5 กระบวนการเตรียมเม็ดอัลลอย

นำผงอัลลอยที่ผ่านการบดผสมตามหัวข้อ 3.4 มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดอัลลอยโดยจะทำการผสมผงอัลลอยเข้ากับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะประสานจากนั้นนำผงผสมที่ได้ใส่ในแม่พิมพ์อัดสาร โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ที่จุดอ่อนจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานและลักษณะผิวหน้าเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมบัติต่างๆ มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้เลือกปรับปรุงวัสดุด้วยการใช้เทคนิคกดอัดแบบแกนเดี่ยวร่วมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วยดังแผนภาพในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะทำให้การกดอัดชิ้นงานพร้อมกับให้ความร้อนไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการกดอัดชิ้นงานแบบแกนเดี่ยวร่วมกับการให้ความร้อนควบคู่ไป

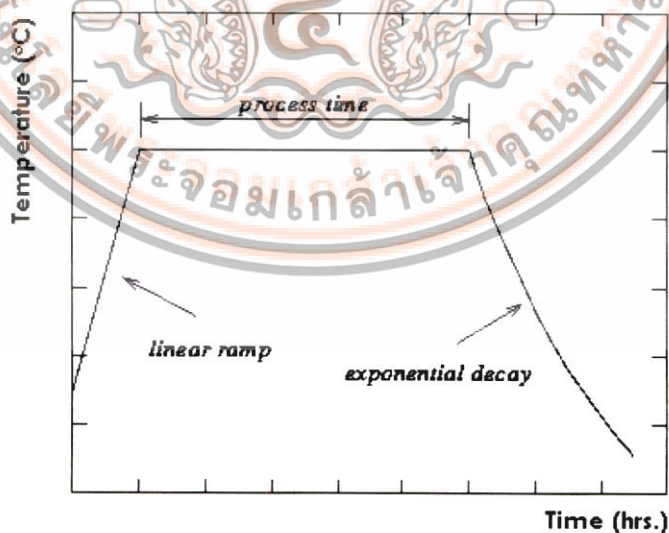
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือเนื้อหาบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ ผู้ที่ฝ่าฝืนจะมีความผิดตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



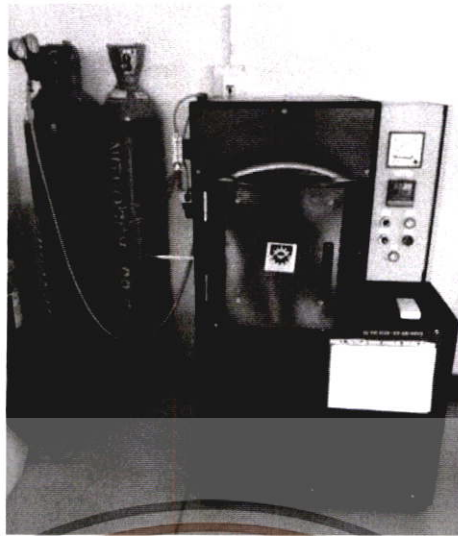
รูปที่ 3.7 เม็ดอัลลอยที่ผ่านการกดอัดแบบแกนเดียวร่วมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วย

3.6 กระบวนการบำบัดด้วยความร้อน

ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการกดอัดแบบแกนเดียวร่วมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วยมาทำการบำบัดด้วยความร้อนด้วยการอบอ่อน (annealing) ซึ่งเป็นการนำชิ้นงานไปให้ความร้อนซ้ำอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิซินเตอร์เล็กน้อย (ราว 100 องศาเซลเซียส) จากนั้นทิ้งให้อุณหภูมิจะลดลงต่ำอย่างช้าๆ ภายในเตาจนวัสดุเย็นตัว โดยวัตถุประสงค์หลักของการอบอ่อนคือการระบายความเครียด (stress relieve) ภายในเนื้อสาร ช่วยให้เนื้อของวัสดุมีความอ่อนนุ่มและเหนียวมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้รูพรุนลดลงด้วย โดยแผนผังการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงชิ้นงานด้วยการอบอ่อนแสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิในการอบอ่อนเป็น 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเตาไฟฟ้าสำหรับเผาสำหรับบำบัดด้วยความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนผังการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงชิ้นงานด้วยการอบอ่อน (annealing)



รูปที่ 3.9 เตาไฟฟ้าสำหรับบำบัดด้วยความร้อน

### 3.7 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ

#### 3.7.1 ความหนาแน่น

นำเม็ดอัลลอยทั้งหมดมาตรวจวัดความหนาหลังการเผาไหม้โดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes method) เริ่มจากนำเม็ดอัลลอยมาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วปล่อยให้เม็ดอัลลอย เย็นตัวลงเองในน้ำที่ทำการต้ม จากนั้นจึงนำเม็ดอัลลอยที่ผ่านการต้มและปล่อยให้เย็นตัวลงมาชั่งในน้ำ ( $W_3$ ) เมื่อชั่งในน้ำเสร็จให้นำเอาเม็ดมาชั่งน้ำหนักออกด้วยกระดาษหิซซู แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งอีกครั้ง น้ำหนักที่ได้จะเรียกว่าน้ำหนักจากการชั่งเปียกหรือชั่งหมาด ( $W_2$ ) เมื่อผ่านการชั่งสองขั้นตอนนี้แล้วให้นำเม็ดอัลลอย ไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 80 °ซ อบให้แห้งสนิทแล้วนำเม็ดอัลลอย มาชั่ง โดยน้ำหนักที่ได้จะเรียกว่าน้ำหนักจากการชั่งแห้ง ( $W_1$ ) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณความหนาแน่นตามสมการนี้

$$\rho_c = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \times \rho_{H_2O} \quad (3.1)$$

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)

### 3.7.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัว

การหาค่าการหดตัวของเม็ดอัลลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการขึ้นเตอรืนั้นสามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดอัลลอยก่อนและหลังการขึ้นเตอรืจากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\% \text{ shrinkage} = \left[ \frac{d_1 - d_2}{d_3} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

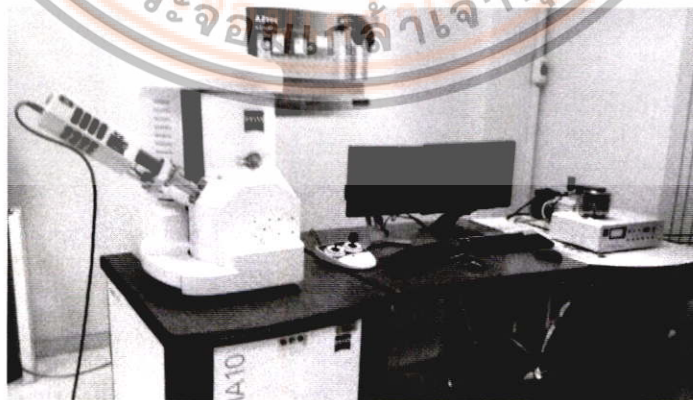
โดยที่  $d_1$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอัลลอยก่อนการขึ้นเตอรื (มิลลิเมตร)

$d_2$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอัลลอยหลังการขึ้นเตอรื (มิลลิเมตร)

### 3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและพื้นผิว

#### 3.8.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

นำเม็ดอัลลอยทั้งหมดมาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 โดยเริ่มจากการนำเม็ดโลหะอัลลอยแต่ละสัตส่วนองค์ประกอบไปติดบนแท่นทองเหลือง (stub) ด้วยเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานต่อไป



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

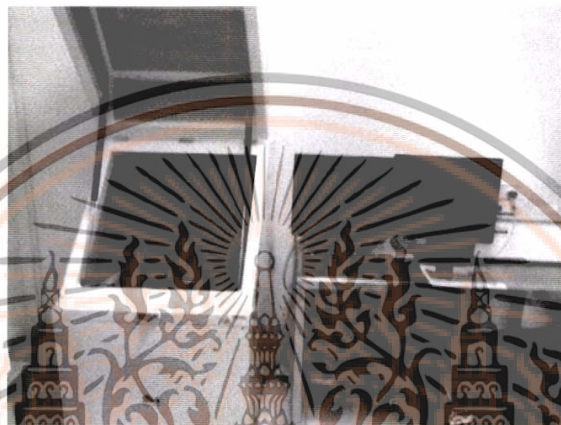
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารนี้โดยผู้ประจักษ์ซึ่งมีอำนาจแก้ไข

This material is for educational purposes only. It is not intended for commercial use. Any modification of the content is forbidden.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.8.2 ตรวจสอบลักษณะของภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope)

นำเม็ดอัลลอยทั้งหมดมาทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอมระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของอัลลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 และจากนั้นกล้องจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิวเพื่อให้เห็นถึงลักษณะสูง-ต่ำของผิวหน้า รวมถึงความขรุขระของชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

### 3.9 การตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility)

สำหรับการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพนั้นเป็นการตรวจสอบปริมาณไอออนของโลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอัลลอยแต่ละตัวที่ชิ้นงานจะปลดปล่อยอย่างสารละลาย โดยวัสดุใดๆ จะสามารถเข้ากันได้ดีทางชีวภาพหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากชนิดและปริมาณของไอออนโลหะว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย โดยวิธีการทดสอบจะเริ่มจากการแช่ชิ้นงานอัลลอยแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบลงในสารละลายจำลองพลาสมาของเลือดที่มีไอออนเหมือนเลือดจริงๆ ดังตารางที่ 3.3 โดยการตรวจสอบนี้ทำได้โดยการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานด้วยการสันแบบอัลตราโซนิคเม็ดตัวอย่างเป็นเวลา 15 นาที ต่อมาแช่ในสารละลายจำลองพลาสมาของเลือด เป็นเวลา 3 7 15 และ 30 วัน ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่มีชิ้นงานแช่อยู่ตามเวลาที่กำหนด แล้วนำไปตรวจสอบหาปริมาณไอออนโลหะที่ชิ้นงานปลดปล่อยออกมาด้วยสารละลายจำลองพลาสมาของเลือดนี้ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (AAS) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่อะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นระดับหนึ่งโดยเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจง

ตารางที่ 3.3 ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายจำลองพลาสมาของเลือดเทียบกับความเข้มข้นของเลือด [20]

Ion	Concentration (mmol/dm <sup>3</sup> )	
	Simulated body fluid (SBF)	Human blood plasma
Na <sup>+</sup>	142.0	142.0
K <sup>+</sup>	5.0	5.0
Mg <sup>2+</sup>	1.5	1.5
Ca <sup>2+</sup>	2.5	2.5
Cl <sup>-</sup>	147.8	103.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.2	27.0
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.0	1.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.5	0.5



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (atomic absorption spectroscopy; AAS)

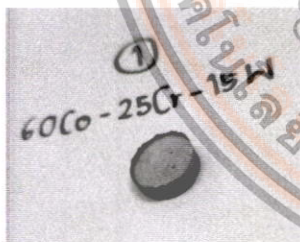
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย  
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วย ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น ลักษณะโครงสร้างจุลภาค สันฐานวิทยาของผิวหน้า และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยในระบบโคบอลต์-โครเมียมทั้งหมดในสัดส่วนที่กำหนด ทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

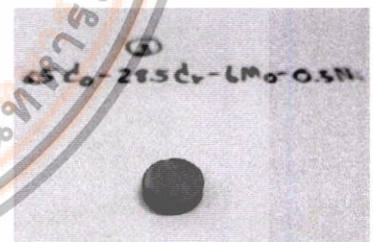
เมื่อชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดซึ่งได้แก่ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ผ่านการผสมด้วยเทคนิคบดย่อยด้วยลูกบอลและกดอัดแบบแกนเดี่ยวร่วมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วพบว่าลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าเม็ดอัลลอยทั้งหมดมีสีน้ำตาลปนขาวและมีเฉดสีที่แตกต่างกันไปตามสัดส่วนองค์ประกอบ ผิวหน้าเรียบ มีความแน่นตัวสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราว 10 มิลลิเมตร และมีความหนาราว 1 มิลลิเมตร ทั้งนี้อัตราการหดตัวภายหลังให้ความร้อนจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ไม่ได้ปรากฏอย่างมีนัยยะสำคัญใดๆ



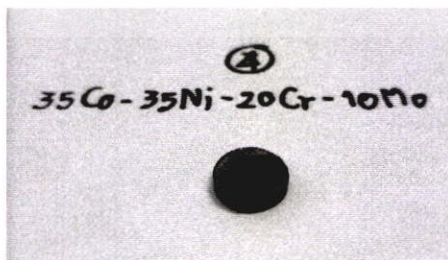
(ก) 60Co-25Cr-15W



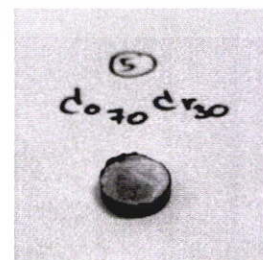
(ข) 60Co-25Cr-5Mo-10W



(ค) 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni



(ง) 35Co-35Ni-20Cr-10Mo

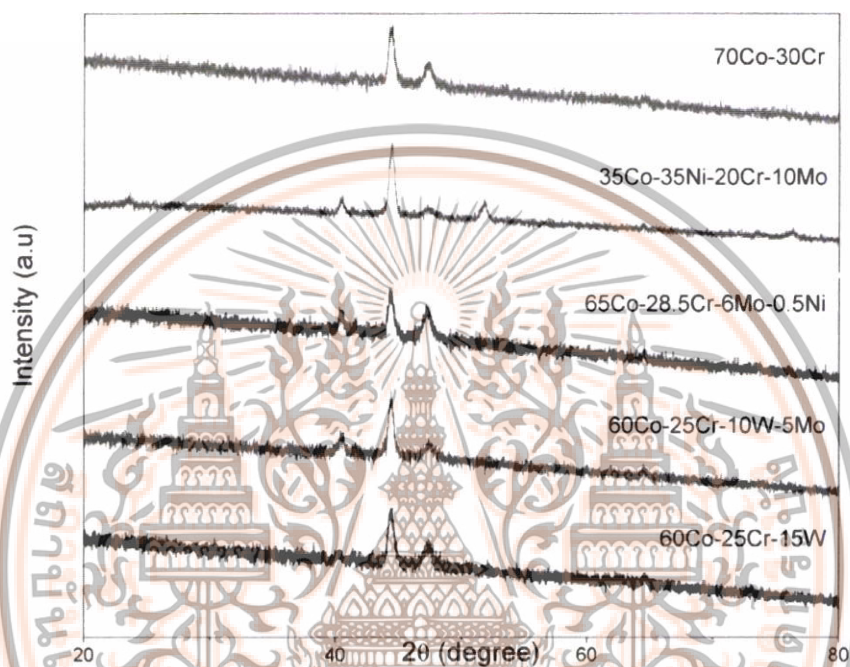


(จ) 70Co-30Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่กรณีที่มีการขออนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัดก่อนการใช้งาน ทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลของเอกสารนี้ไว้ใช้  
This material is for educational use only and is not intended for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เกิดขึ้นที่ตำแหน่งราว  $44^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS file no. 894307 มีโครงสร้างผลึกเป็น body centered cubic มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 3.544 \text{ \AA}$  ส่วนพีคของโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นสัดส่วนหลักเช่นกันจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งราว  $43^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS file no. 892871 มีโครงสร้างผลึกเป็น hexagonal closed packing มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 2.722 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.434 \text{ \AA}$



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ

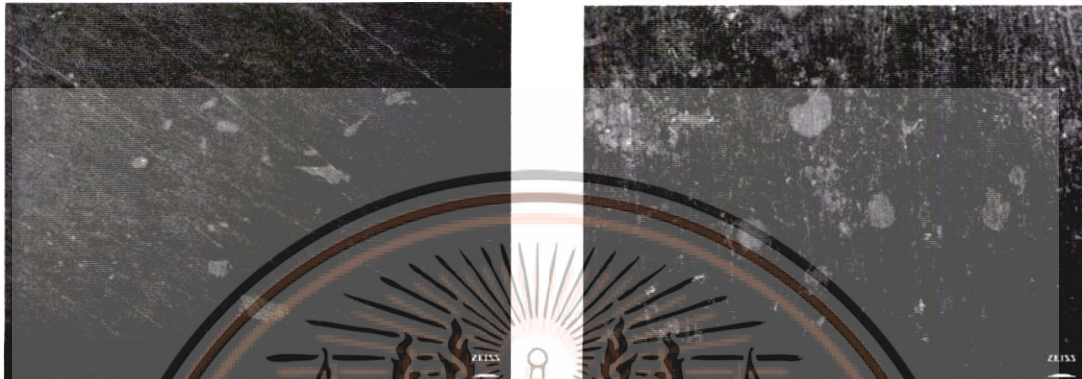
#### 4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุ

นำชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดซึ่งได้แก่ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ที่ผ่านการผสมด้วยเทคนิคบดย่อยด้วยลูกบอลและกดอัดแบบแกนเต็ยร่วมกับการให้ความร้อนควบคุมไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการเผาพร้อมกับการกดอัดนั้นมีความขรุขระและมีสิ่งสกปรกติดอยู่มากซึ่งไม่สามารถถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคแบบหลังเตรียมเสร็จ

ทันที (as-prepared) ได้ ต้องทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเสียก่อนเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่น การค้า  
 วัสดุนี้ใช้ได้ฟรีภายใต้เงื่อนไขที่ห้ามแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ทุกครั้งเมื่อใช้  
 This material is available under a Creative Commons license. For more information, see http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ออกไปจึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นเกรนของโครงสร้างจุลภาคได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในขั้นตอนนี้ อย่างไรก็ตามภาพที่แสดงในรูปที่ 4.3 นั้นก็แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของชิ้นงานในระบบนี้ในบางสัดส่วน ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นถึงความแน่นตัวของชิ้นงานได้ดี มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ประปราย นอกจากนี้ยังมีลักษณะสีผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันซึ่งคาดว่าเป็นผลจากความแตกต่างของสัดส่วนองค์ประกอบนั่นเอง



(ก) 60Co-25Cr-15W

(ข) 60Co-25Cr-5Mo-10W



(ค) 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni

(ง) 35Co-35Ni-20Cr-10Mo



(จ) 70Co-30Cr

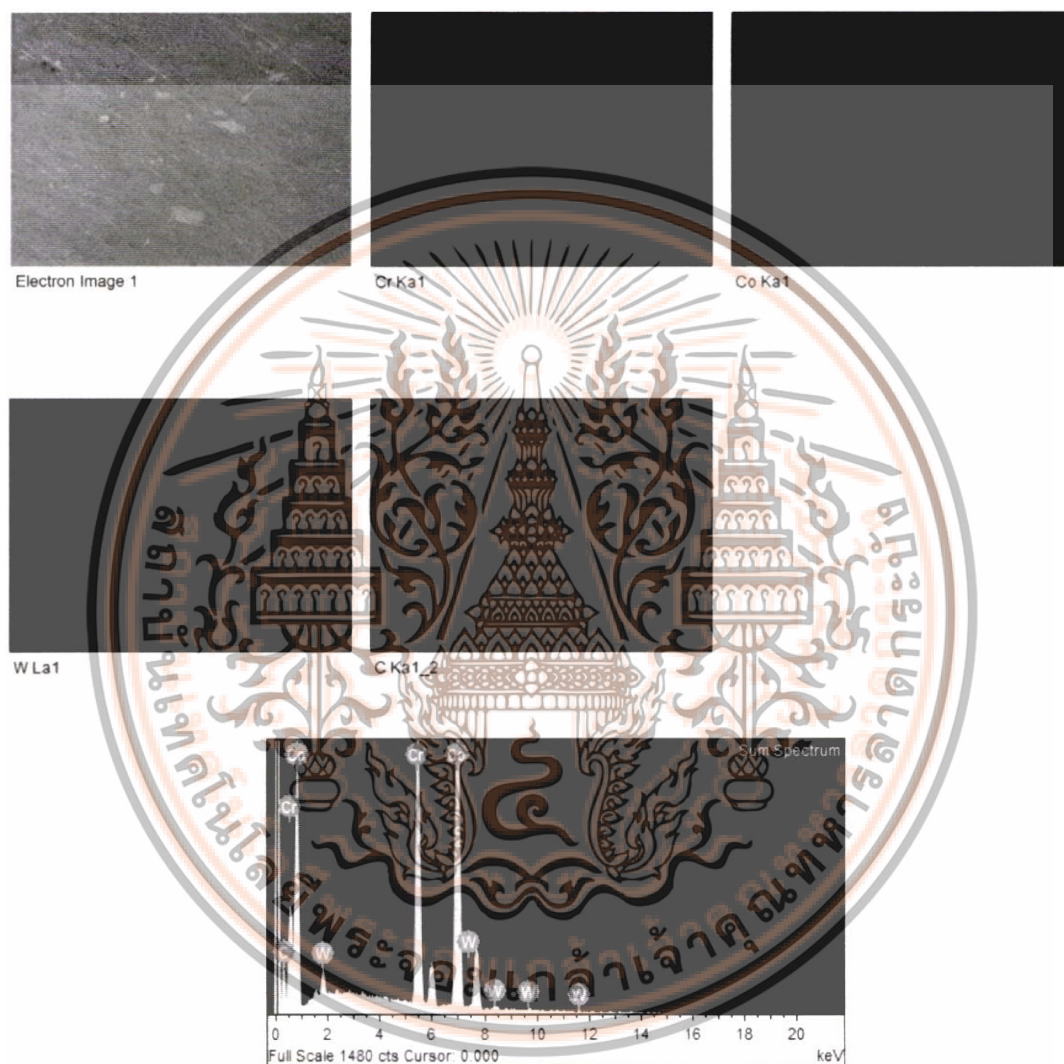
รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าถ้าจะนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ขออนุญาตในแง่ของประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามที่สงวนไว้สำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

This material is copyrighted for educational purposes only and is not allowed to be reproduced, modified, or used for commercial purposes without the permission of the copyright holder.

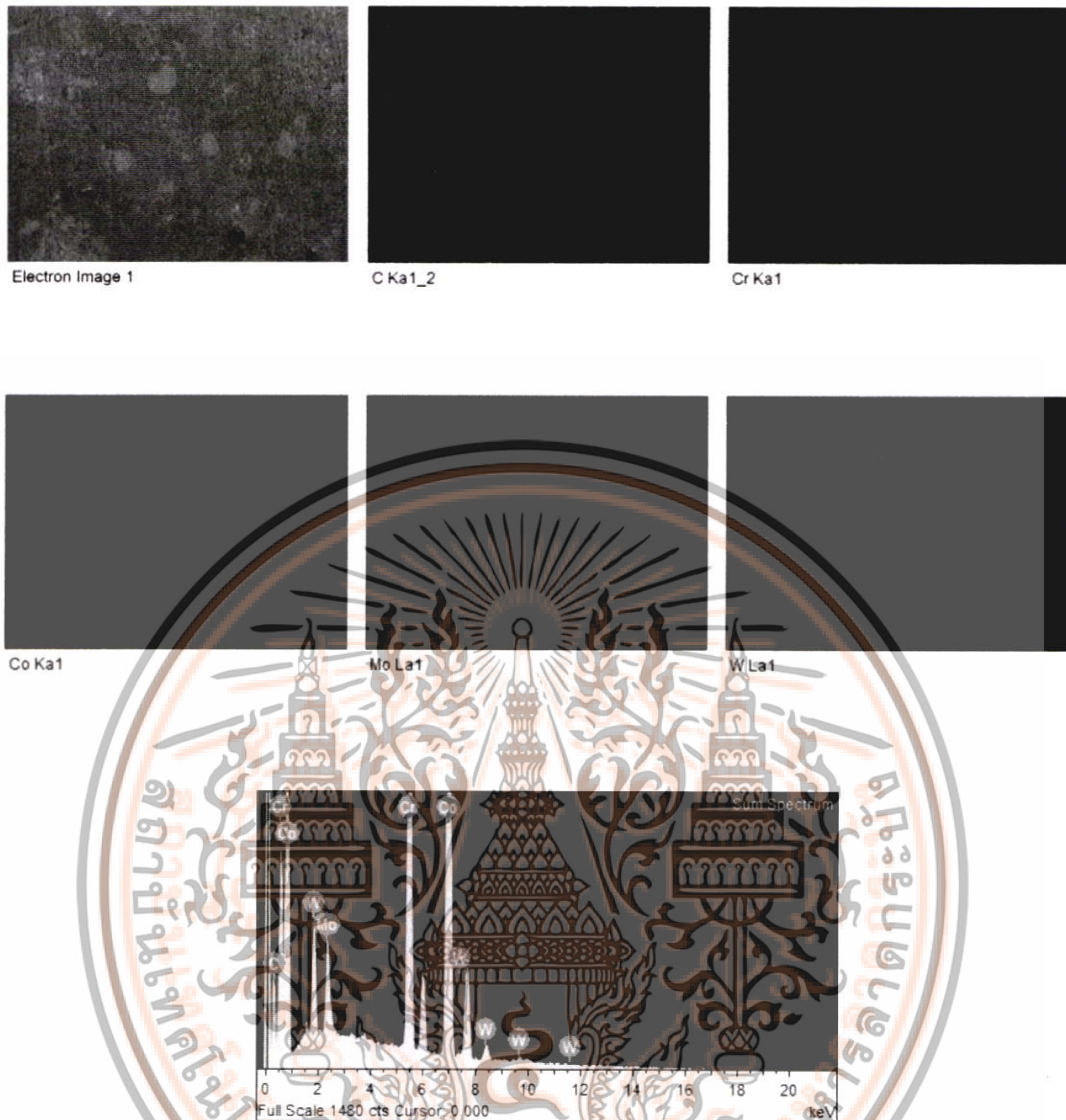
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการกระเจิงพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX) ก็ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.8 ซึ่งจากรูปทั้งหมดก็จะเห็นว่าปริมาณของธาตุที่แสดงก็สอดคล้องกับสัดส่วนองค์ประกอบที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามในทุกสัดส่วนองค์ประกอบจะปรากฏพีคของธาตุคาร์บอน (C) ขึ้นด้วย เนื่องจากในการเตรียมชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ EDX นั้นจำเป็นต้องใช้เทปคาร์บอนยึดติดชิ้นงานเข้ากับแท่นวัดนั่นเอง



Element	Weight%	Atomic%
C K	10.22	35.43
Cr K	26.01	20.82
Co K	61.09	43.14
W M	2.68	0.61
Totals	100.00	

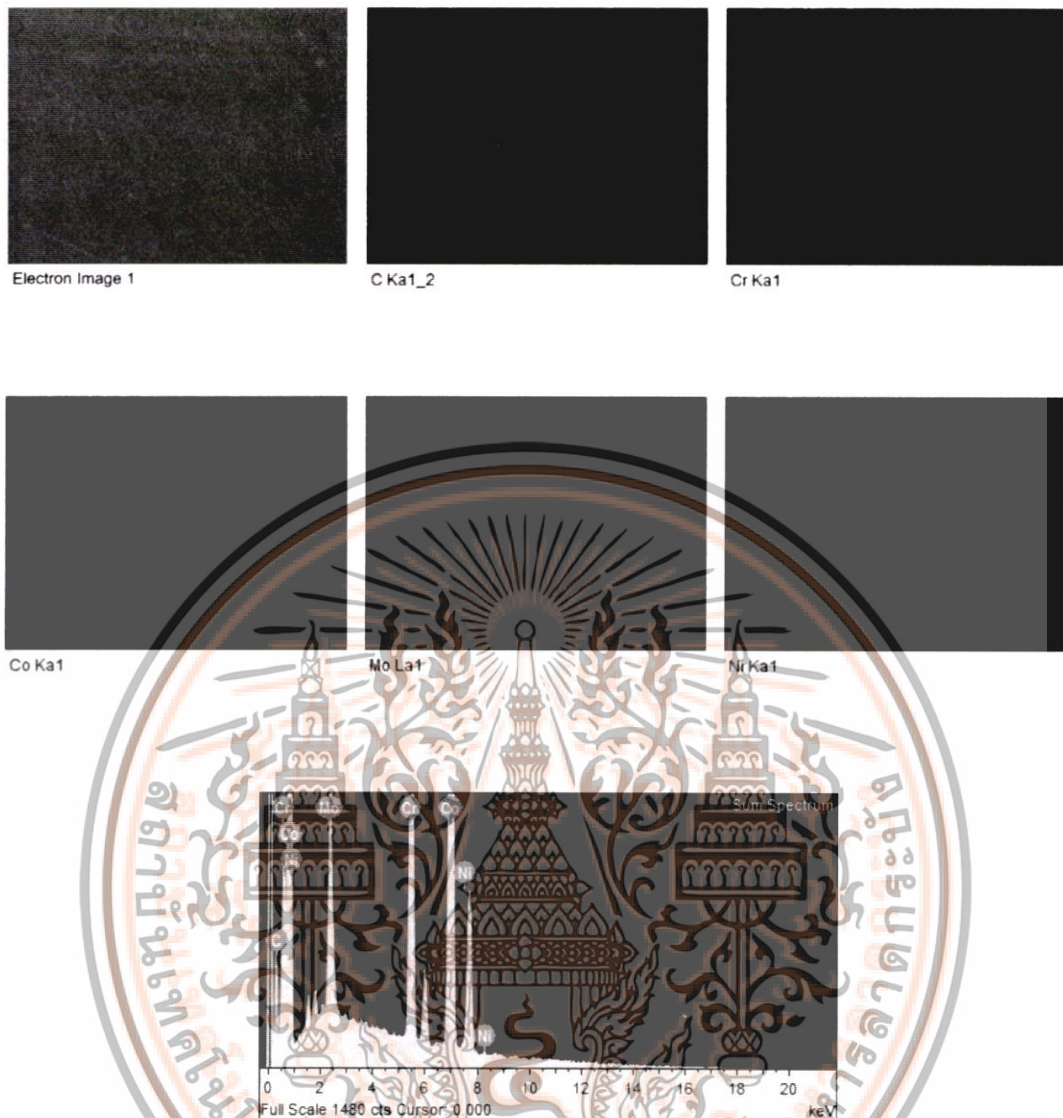
รูปที่ 4.4 ภาพแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 60Co-25Cr-15W  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งห้ามมิให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
This material is copyrighted for educational use only. Not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Element	Weight%	Atomic%
C K	12.41	41.58
Cr K	24.30	18.81
Co K	53.80	36.74
Mo L	3.91	1.64
W M	5.58	1.22
Totals	100.00	

**รูปที่ 4.5** กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 60Co-25Cr-5Mo-10W

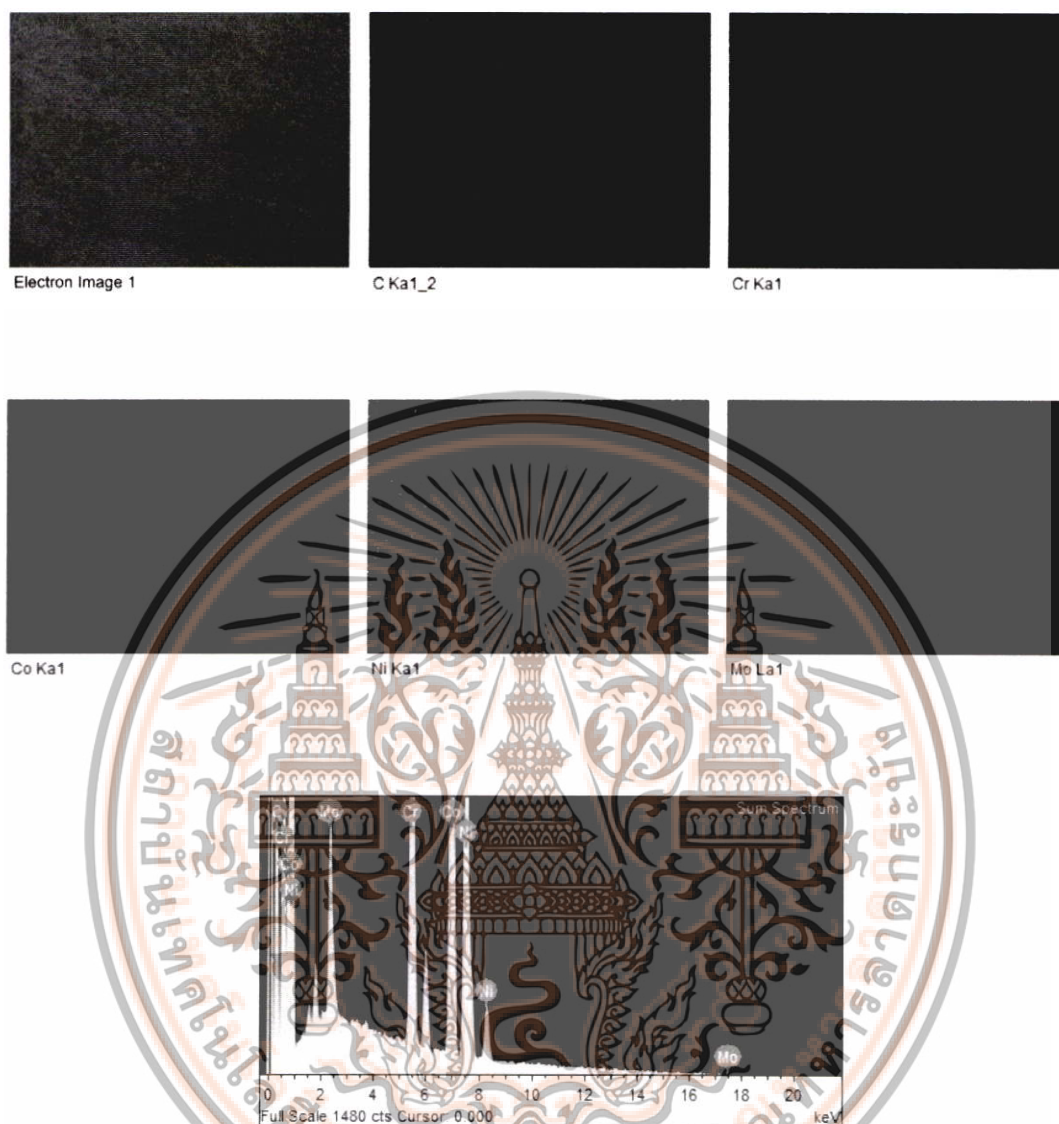
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ในวัตถุประสงค์อื่นที่นอกเหนือจากนี้ และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้ง  
 This material is for educational use only. It is not to be used for commercial purposes. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Element	Weight%	Atomic%
C K	11.98	40.29
Cr K	15.51	12.05
Co K	64.25	44.03
Ni K	0.55	0.38
Mo L	7.71	3.25
Totals	100.00	

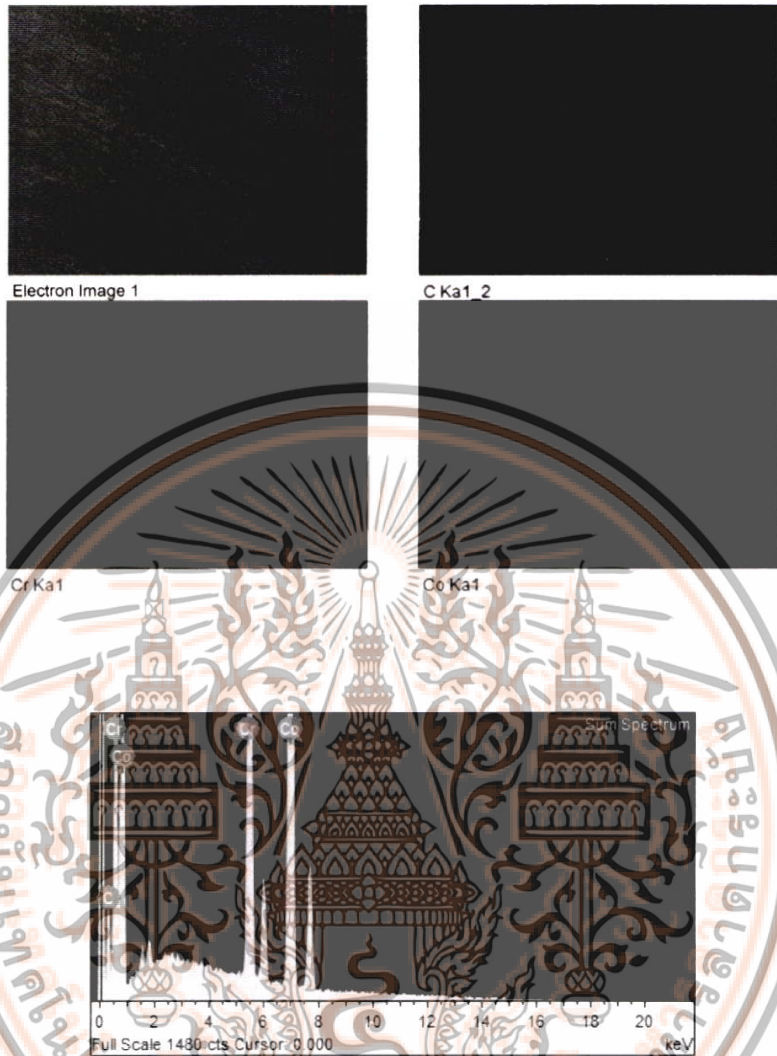
**รูปที่ 4.6** กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การที่หน่วยงานใดได้ดัดแปลงเนื้อหาบางส่วนและตั้งชื่อต่างจากฉบับต้นฉบับของเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 This material is for personal use only. It is not to be used for commercial purposes.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.7** กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 35Co-35Ni-20Cr-10Mo เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตามที่ห้ามมิให้คัดลอกหรือใช้เนื้อหาที่แสดงออกซึ่งการอ้างสิทธิ์ในทรัพย์สินทางปัญญาโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งเมื่อเผยแพร่ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



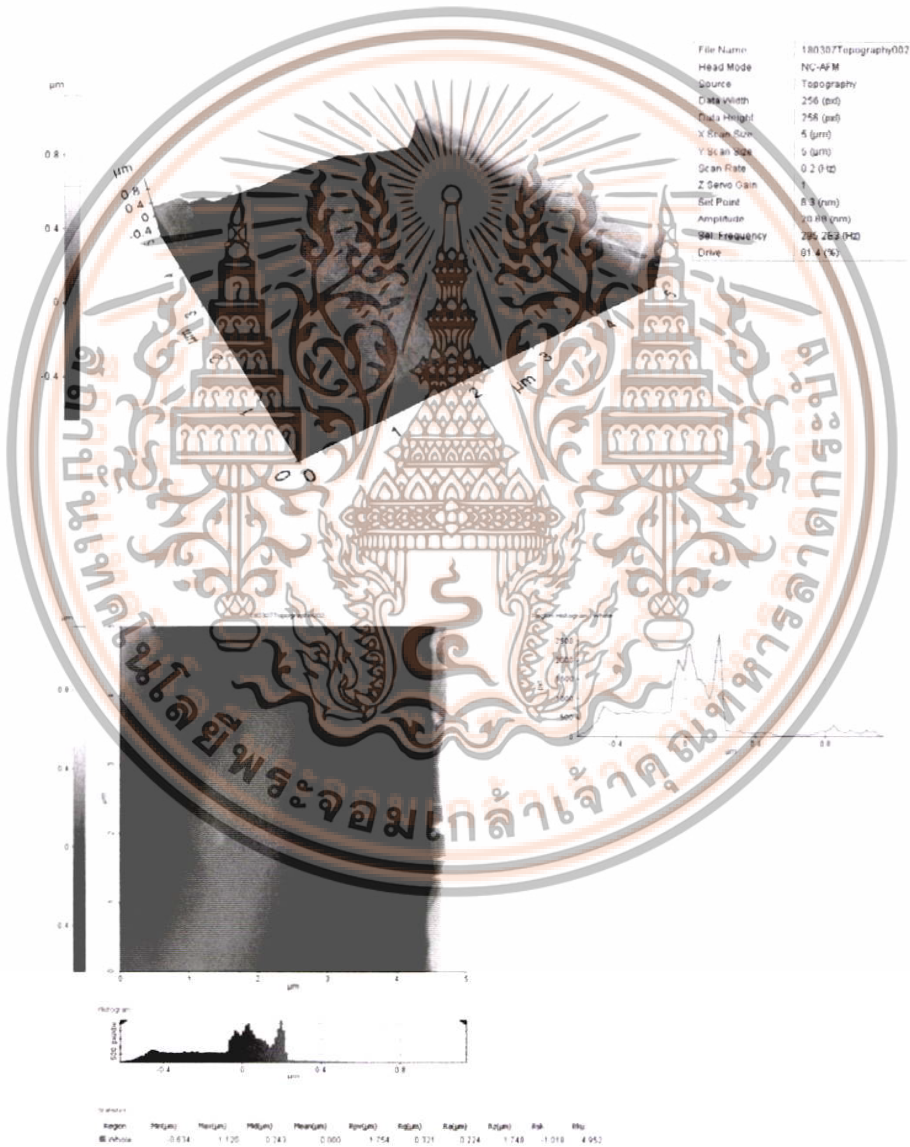
Element	Weight%	Atomic%
C K	9.96	34.26
Cr K	28.27	22.45
Co K	61.77	43.29
Totals	100.00	

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของอัลลอย 70Co-30Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การที่ท่านมีสำเนาของเอกสารฉบับนี้เพื่อการศึกษาหรือเพื่อการใช้งานภายในองค์กรของท่าน  
 This material is for educational use only and is not intended for commercial use.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิว

นำชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดซึ่งได้แก่ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ที่ผ่านการผสมด้วยเทคนิคบดย่อยด้วยลูกบอลและกดอัดแบบแกนเดี่ยวร่วมกับการให้ความร้อนควบคุมไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope; AFM ) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวสามมิติและความขรุขระของผิวหน้าโดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9-4.13



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 60Co-25Cr-15W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การที่ทางเราให้ต้นฉบับนี้ขึ้นที่สาธารณะคือต้องการแจ้งถึงเนื้อหาของเอกสารให้ครบถ้วนที่ควรนำเข้าไป  
This material is for personal and educational use only. It is not to be used for commercial purposes.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 60Co-25Cr-5Mo-10W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ การใช้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเพื่อการค้าต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารให้ทราบก่อนนำเอกสารไปใช้  
 This material is for educational use only. It is not allowed for commercial use.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.11** ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม การนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของอัลลอย 35Co-35Ni-20Cr-10Mo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การที่ท่านมีหน้าที่ต้องป้อนข้อมูลหรือแจ้งถึงปัญหาของเนื้อหาให้บริษัทฯ มีหน้าที่  
 This material is for informational use only and is not to be used for commercial purposes.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



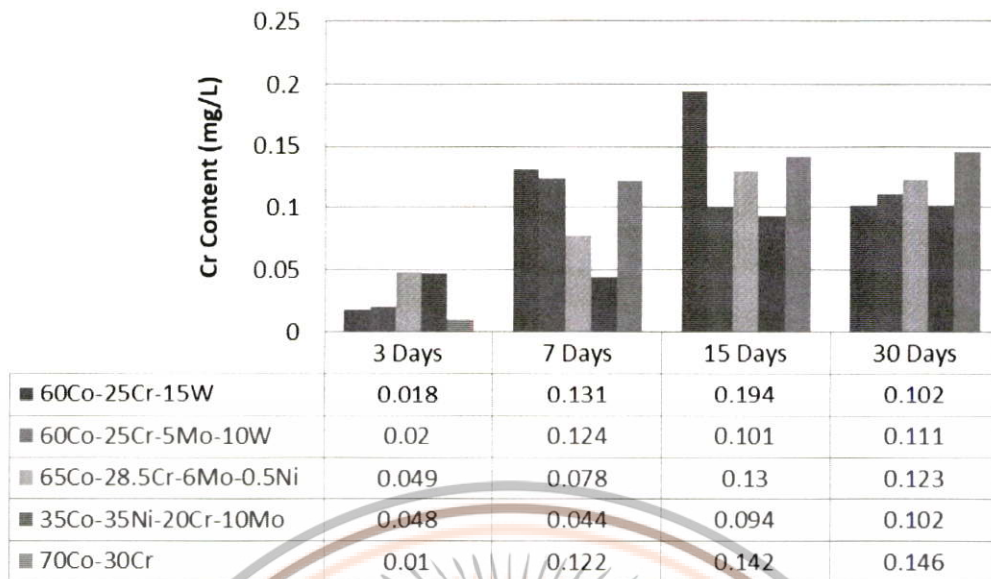
จากผลการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของอัลลอยทั้งหมดดังรูปที่ 4.9-4.13 จะเห็นว่าแต่ละชิ้นงานมีความเรียบและขรุขระแตกต่างกัน ทั้งนี้ความขรุขระของพื้นผิวนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดอ่อนในการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเป็นหลัก อีกทั้งชิ้นงานยังมีรูพรุนค่อนข้างมากในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ ซึ่งรูพรุนส่วนหนึ่งก่อตัวขึ้นที่ผิวหน้าดังแสดงในภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ 4.3) และข้อมูลความหนาแน่นที่คำนวณได้ (ตารางที่ 4.1) แม้ว่าจะทำการขัดพื้นผิวให้ละเอียดเพื่อกำจัดออกไปแล้วก็ยังสามารถสังเกตเห็นความขรุขระของผิวหน้าอยู่เนือง

#### 4.5 ผลการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

นำชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดซึ่งได้แก่ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ที่ผ่านการผสมด้วยเทคนิคบดย่อยด้วยลูกบอลและกดอัดแบบแกนเดี่ยวรวมกับการให้ความร้อนควบคุมไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทราย จากนั้นนำมาแช่อัลลอยทั้งหมดไปแช่สารละลายจำลองของเหลวในร่างกาย (simulated body fluid หรือ SBF) เป็นเวลานาน 3 7 15 และ 30 วันตามลำดับ แล้วทำการตรวจสอบปริมาณไอออนของโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมายังสารละลาย SBF ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (atomic absorption spectroscopy; AAS) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนค่าการปลดปล่อยไอออนของโลหะออกมา โดยอัลลอยนั้นๆ จะมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากชนิดและปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมายังของเหลว SBF ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ซึ่งผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยแต่ละองค์ประกอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 โดยจากกราฟเป็นการแสดงปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะโครเมียมของชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดที่ตรวจสอบได้จากสารละลาย SBF ที่มีการแช่ชิ้นงานทิ้งไว้ในเป็นเวลา 3 7 15 และ 30 วันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W และ 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni นั้นพบว่าพฤติกรรมปลดปล่อยไอออนโลหะของชิ้นงานนั้นมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และการปลดปล่อยไอออนจะลดลงหลังจากที่ชิ้นงานอัลลอยถูกแช่ไปแล้ว 15 วัน ในขณะที่ที่สัดส่วนองค์ประกอบ 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr นั้นพบว่าพฤติกรรมปลดปล่อยไอออนโลหะของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุหลักที่ทำให้อัลลอยแต่ละองค์ประกอบแสดงพฤติกรรมดังกล่าวนั้นก็เนื่องมาจากการที่อัลลอยแต่ละตัวมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าความแข็งเชิงกลมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งในกลุ่มแรกนั้นมีค่าความแข็งสูงกว่าจึงทำให้เมื่อไอออนโลหะถูกปลดปล่อยออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

This material is for educational use only. It is not allowed to be used for commercial purposes. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะโครเมียมของชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดที่ตรวจสอบได้จากสารละลาย SBF ที่มีการแช่ชิ้นงานทิ้งไว้ในเป็นเวลา 3 7 15 และ 30 วัน

#### 4.6 ผลของการบำบัดด้วยความร้อน

เมื่อนำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการกัดด้วยแบบแกนเดี่ยวร่วมกับทำให้ความร้อนควบคู่ไปด้วยมาทำการบำบัดด้วยความร้อนด้วยการอบอ่อน (annealing) ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีแล้ว จึงนำมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการอบอ่อน ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยจะเห็นว่าตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ความกว้างของพีคนั้นพบว่าชิ้นงานภายหลังการอบอ่อนนั้นมีลักษณะพีคที่กว้างขึ้น (broaden) มากซึ่งเมื่อพิจารณาสมการของ Scherrer สำหรับใช้หาค่าขนาดของผลึกที่ว่า

$$B_{\text{crystallite}} = \frac{k\lambda}{L \cos \theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

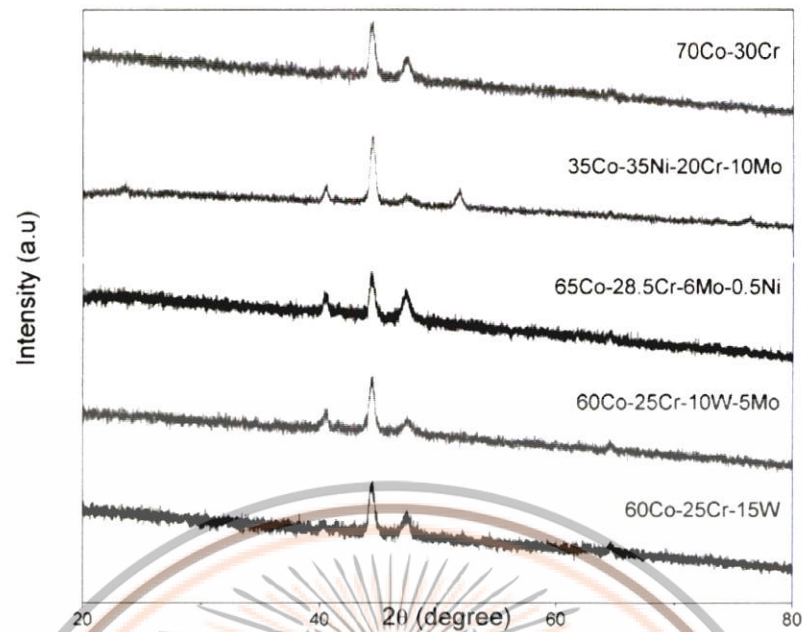
$\theta$  คือ มุมของแบรกก์

$L$  คือ ขนาดผลึกเฉลี่ยที่วัดในทิศตั้งฉากกับผิวของตัวอย่าง

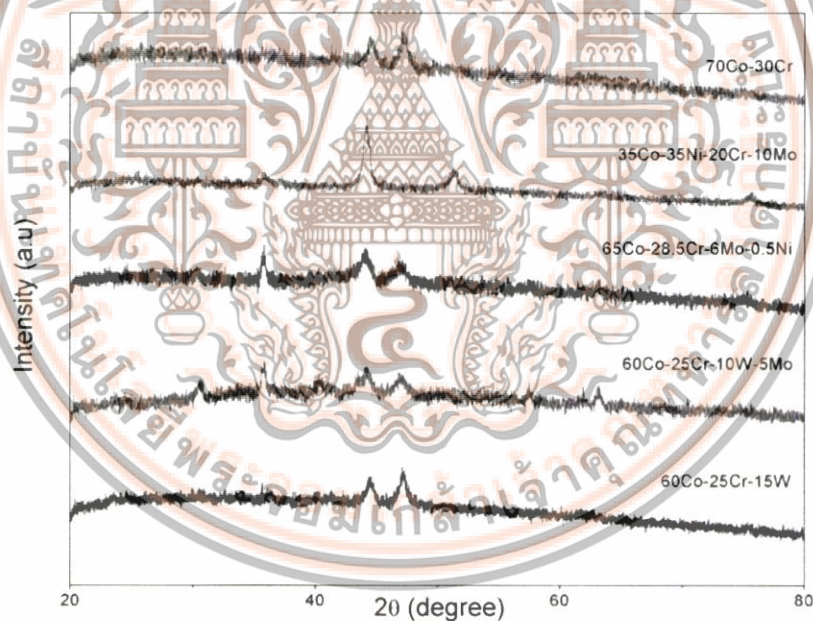
$k$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.89 - 1.39 ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลึก

และ  $B$  คือ ความกว้างเชิงรัศมีที่มุม  $2\theta$  หรือ ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุด (FWHM: full width at half maximum) ก็พบว่ากรณีที่พีคกว้างขึ้น นั่นคือมีค่า  $B$  มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งพิจารณาตามสมการก็จะเห็นว่าค่าขนาดผลึก ( $L$ ) แปรผกผันกับค่า  $B$  นี้ จากตรงนี้สามารถสรุปได้ว่า

การบำบัดชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดด้วยความร้อนตามเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นทำให้ขนาดผลึกเล็กลง ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกภายในชิ้นงานเมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอจากความร้อนที่ให้นั่นเอง



(ก) ก่อนอบอ่อน



(ข) หลังอบอ่อน

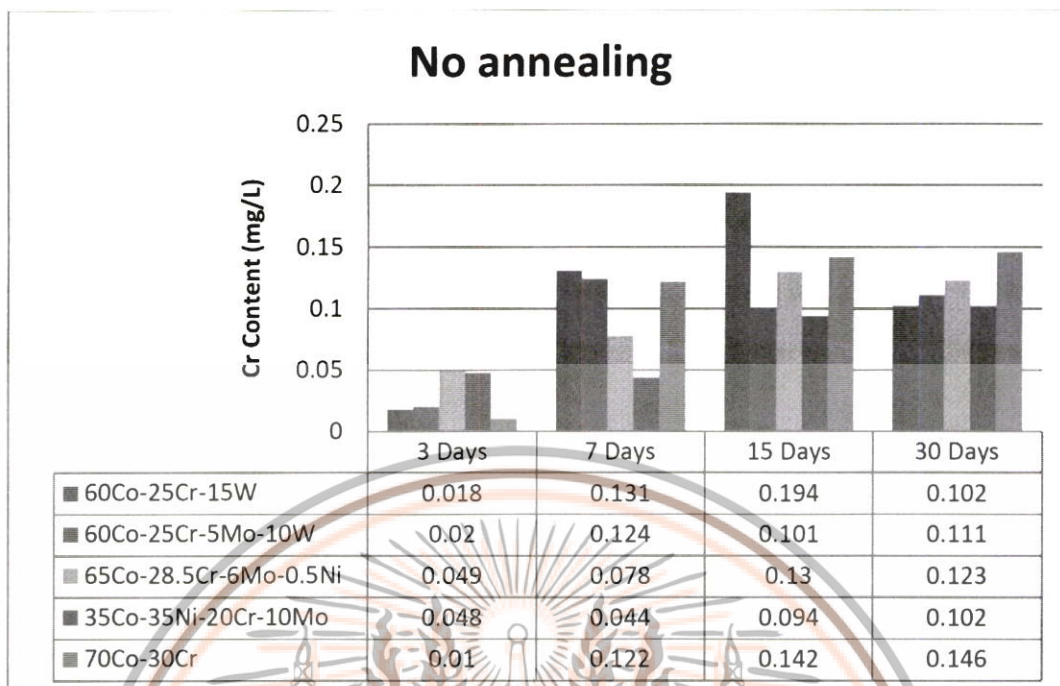
รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นสำหรับอัลลอยทั้งหมดก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยการอบอ่อน (annealing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การที่ท่านมีสิทธิครอบครองในเนื้อหาที่แสดงออกข้างต้นนั้นเป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี  
 This material is reserved for educational purposes only. No part of this document is permitted to be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without the prior written permission of the University of Rajabhat Ramphongphitak.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

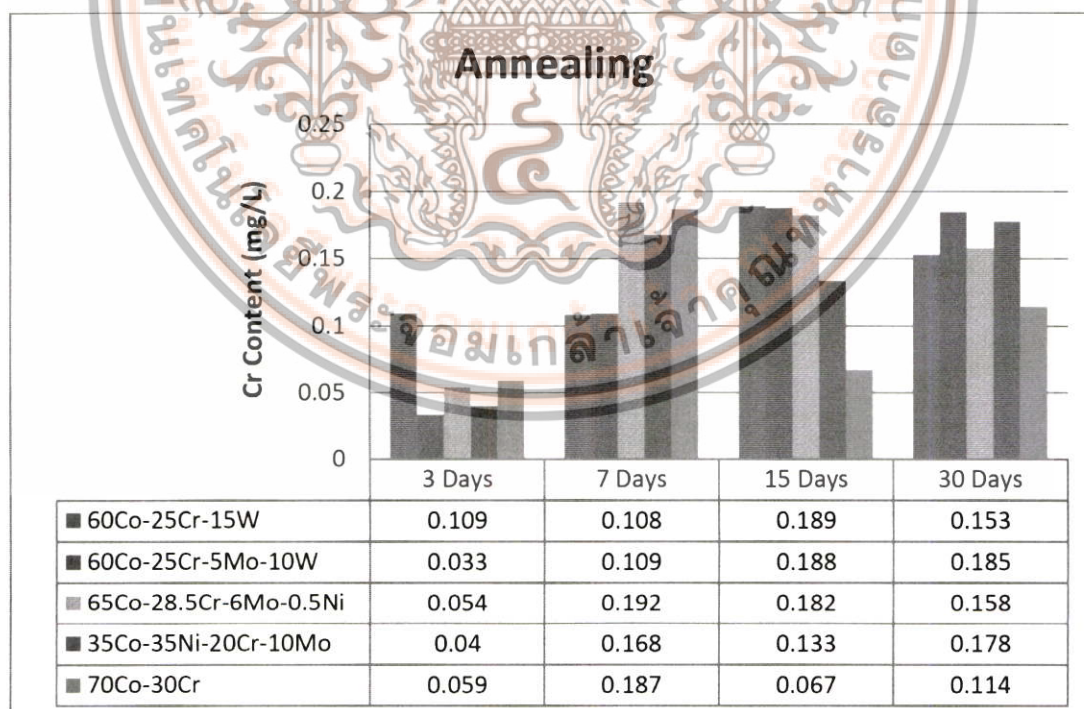


จากนั้นนำชิ้นงานอัลลอยทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนด้วยการอบอ่อน (annealing) ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ เป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มาตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพโดยการแช่ชิ้นงานทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการอบอ่อนไว้ในสารละลายจำลองสภาวะร่างกาย (SBF) เป็นเวลานานตามที่กำหนด จากนั้นทำการตรวจสอบปริมาณของไอออนโลหะที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF ดังกล่าวนี้นว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy หรือ AAS) โดยจากผลการทดลองพบว่าไม่สามารถตรวจสอบปริมาณของโลหะ โคบอลต์ (Co) ได้เลยซึ่งคาดว่าเป็นผลจากโคบอลต์มีปริมาณที่น้อยมากจนเครื่องมือไม่สามารถตรวจพบได้ อีกทั้งโคบอลต์ยังมีความแข็งที่สูงกว่าโลหะอื่นมากทำให้โอกาสที่จะหลุดออกมายังสารละลายมีน้อยมาก สำหรับโครเมียม (Cr) นั้นสามารถตรวจพบได้โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17-4.19 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.17 แสดงปริมาณโลหะ Cr ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนโดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทั้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กัน ส่วนรูปที่ 4.18 แสดงปริมาณโลหะ Cr ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแล้วโดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทั้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กันเช่นกัน สำหรับรูปที่ 4.19 จะแสดงปริมาณโลหะ Cr ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF ที่แช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อนด้วยเงื่อนไขที่กำหนด





รูปที่ 4.17 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนโดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทั้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กัน

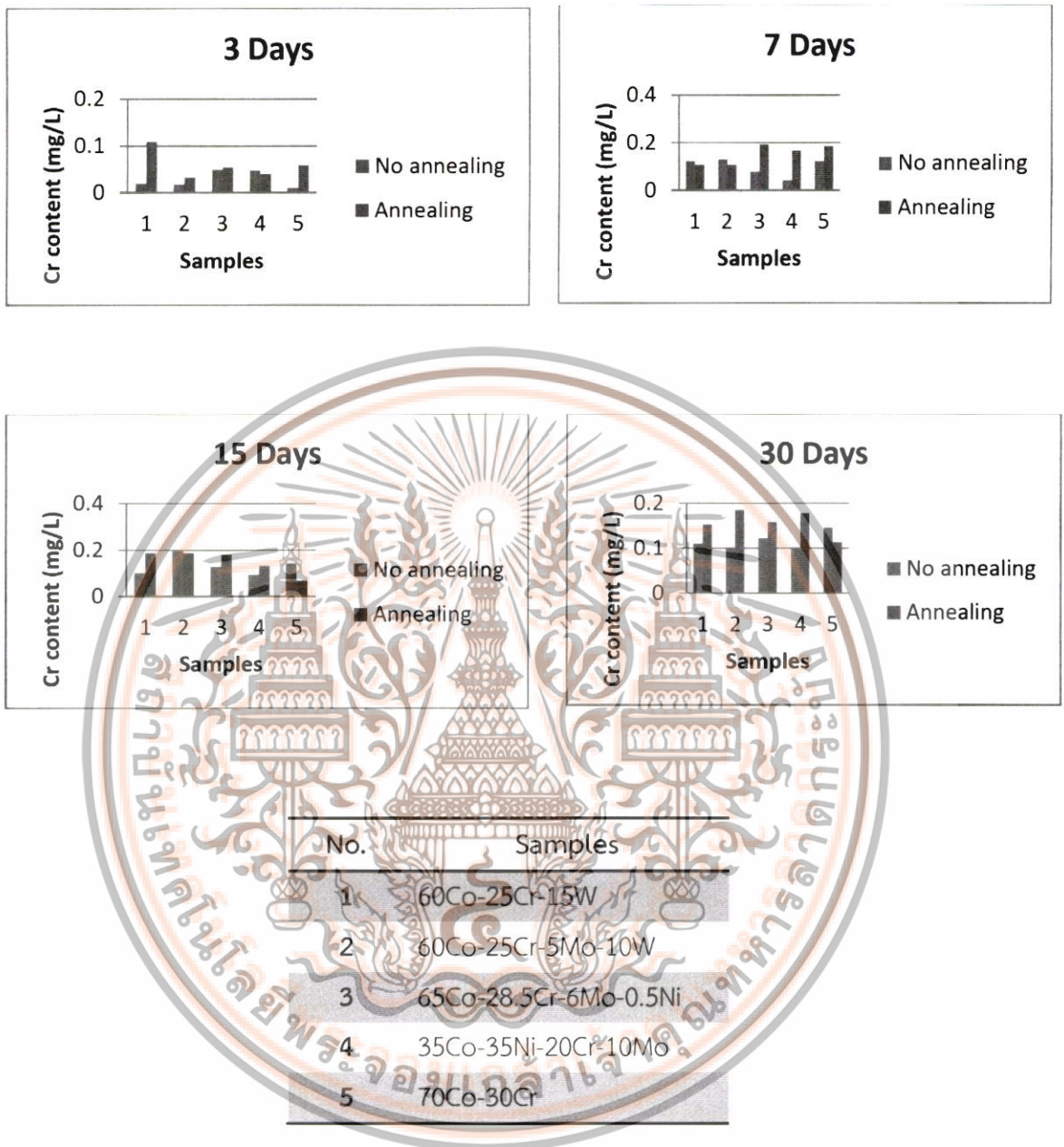


รูปที่ 4.18 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแล้ว โดยได้ทำการแช่ชิ้นงานทั้งหมดไว้ในสารละลายจำลองของเหลวใน

ร่างกายเป็นเวลานานต่าง ๆ กัน

ไม่ว่ากรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is for personal use only. It is not allowed to be modified, copied, or distributed without the permission of the copyright holder. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.19 ปริมาณโลหะโครเมียม (Cr) ที่หลุดออกมายังสารละลาย SBF ที่แช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อนด้วยเงื่อนไขที่กำหนด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการพัฒนากระบวนการผลิต การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ และการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอยโคบอลต์-โครเมียมในระบบที่กำหนดที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิม พร้อมกับผลการตรวจสอบสมบัติที่เกี่ยวข้อง และข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- (1) สามารถสังเคราะห์อัลลอยในระบบโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบเป็น 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกายที่มีศักยภาพสูงได้ ด้วยเทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอลและกดอัดแบบแกนเดียวรวมกับการให้ความร้อนควบคู่ไปด้วยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยขึ้นงานที่ได้ทั้งหมดมีความหนาแน่นสูงสุดราว 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี
- (2) เฟสที่เกิดขึ้นภายในอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr นั้นพบว่ามีกรวางตัวของเฟสโคบอลต์ โครเมียม และองค์ประกอบอื่นๆ อยู่ร่วมกัน และมีปริมาณของแต่ละเฟสแตกต่างกันตามสัดส่วนองค์ประกอบที่กำหนด โดยโคบอลต์ (Co) ซึ่งเป็นสัดส่วนหลักมีข้อมูลสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS file no. 894307 มีโครงสร้างผลึกเป็น body centered cubic มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 3.544 \text{ \AA}$  ส่วนโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นสัดส่วนหลักเช่นกันจะสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS file no. 892871 มีโครงสร้างผลึกเป็น hexagonal closed packing มีพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์  $a = 2.722 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.434 \text{ \AA}$  และเมื่อตรวจสอบปริมาณของธาตุแต่ละตัวก็พบว่าสอดคล้องกับสัดส่วนองค์ประกอบที่กำหนดไว้
- (3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวของชิ้นงานอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr พบว่าสามารถสังเกตเห็นถึงความแน่นตัวของชิ้นงานได้ดี มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ประปราย นอกจากนี้ยังมีลักษณะสีผิวและความขรุขระของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากความแตกต่างของสัดส่วนองค์ประกอบนั่นเอง

- (4) เมื่อนำอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ไปบำบัดด้วยความร้อนที่

อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 °ซ ต่อนาที พบว่าอัลลอยที่ได้มีรูพรุนน้อยลงเนื่องจากความร้อนที่ให้เข้าไปทำให้เกรนเกิดการโตขึ้นมา ส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้นมีการกวัดแกว่งของสัดส่วนองค์ประกอบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดผลึกเล็กลงด้วย ซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกภายในชิ้นงานเมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอจากความร้อนที่ให้นั่นเอง

- (5) เมื่อนำอัลลอยที่สัดส่วนองค์ประกอบ 60Co-25Cr-15W 60Co-25Cr-5Mo-10W 65Co-28.5Cr-6Mo-0.5Ni 35Co-35Ni-20Cr-10Mo และ 70Co-30Cr ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 °ซ ต่อนาที ไปตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพด้วยการนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกาย (SBF) เป็นเวลานาน 3 7 15 และ 30 วันแล้วตรวจสอบปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมาในสารละลาย SBF พบว่าไม่สามารถตรวจสอบปริมาณของโลหะโคบอลต์ (Co) ได้เลยซึ่งคาดว่าเป็นผลจากโคบอลต์มีปริมาณที่น้อยมากจนเครื่องมือไม่สามารถตรวจพบได้ อีกทั้งโคบอลต์ยังมีความแข็งที่สูงกว่าโลหะอื่นมากทำให้โอกาสที่จะหลุดออกมาในสารละลายมีน้อยมาก สำหรับโครเมียม (Cr) นั้นสามารถตรวจพบได้ซึ่งพบว่าปริมาณไอออน Cr ที่หลุดออกมาในสารละลาย SBF สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแล้วนั้นจะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่อัลลอยเมื่อบำบัดด้วยความร้อนแล้วจะทำให้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการปลดปล่อยไอออนของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย นั่นคือ อัลลอยที่ได้รับการบำบัดด้วยความร้อนจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้นและความแข็งลดลง อีกทั้งความเครียดในชิ้นงานลดลงด้วยจึงทำให้ไอออนเกิดการหลุดออกมา ยิ่งสิ่งแวดล้อมได้ง่ายขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ควรมุ่งเน้นพัฒนาความหนาแน่นของอัลลอยให้สูงขึ้นอีก เนื่องจากรูพรุนมีผลค่อนข้างมากต่อสมบัติของชิ้นงาน ซึ่งอาจใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปหรือการให้ปริมาณความร้อนที่มากยิ่งขึ้นเข้ามาช่วย
- (2) ควรมีการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของชิ้นงานในเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น ที่ความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

#### 6.1 ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

6.1.1 Kantapon Aimprakod, Phieraya Poolphol, Tosapol Maluangnont and **Wanwilai Vittayakorn**, “Process Development and Possibility of Cobalt-Chromium Alloys for Surgical Implant Applications Fabricated in Thailand”, The 43<sup>rd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT43), October 17-19, 2017, Bangkok, Thailand.

6.1.2 **Wanwilai Vittayakorn**, Phieraya Poolphol, Kantapon Aimprakod and Tosapol Maluangnont, “Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method”, The Second International Conference on Science and Technology of Emerging Materials (STEMa 2018), July 18-20, 2018, Pattaya, Thailand.

#### 6.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

6.2.1 **Wanwilai Vittayakorn**, Phieraya Poolphol, Kantapon Aimprakod and Tosapol Maluangnont, “Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method”, Materials Today: Proceedings, 2018. (Article in press)



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไทยรัฐออนไลน์, ไทยจ่อเข้า 'สังคมผู้สูงอายุ' เต็มตัวปี 68 ล่าสุดกว่า 1 ล้านคนนอนติดเตียง!, ไทยรัฐ, 19 มี.ค. 2557 (สืบค้นวันที่ 26 ส.ค. 2559).
- [2] ISO 10993-1:2009, Biological Evaluation of Medical Devices – Part 1: Evaluation and Testing Within a Risk Management Process, Technical Committee ISO/TC 194.
- [3] L.L. Hench, J. Wilson, An Introduction to Bioceramics, World Scientific, 1993.
- [4] D.J.S. Hyslop, A.M. Abdelkader, A. Cox, D.J. Fray, Acta Materialia 58 (2010) 3124-3130.
- [5] W.C. Rodrigues, L.R. Broilo, L. Schaeffer, G. Knörschild, F.R.M. Espinoza, Powder Technology 206 (2011) 233-238.
- [6] L. Zeng, N. Xiang, B. Wei, The Journal of Prosthetic Dentistry 112 (2014) 1217-1224.
- [7] P. Schmutz, N.-C. Quach-Vu, I. Gerber, The Electrochemical Society Interface (Summer 2008) 35-40.
- [8] M.C. Lucchetti, G. Fratto, F. Valeriani, E. De Vittori, S. Giampaoli, P. Papetti, V. Romano Spica, U. Manzoni, The Journal of Prosthetic Dentistry 114 (2015) 602-608.
- [9] H.R. Kim, Y.K. Kim, J.S. Son, B.K. Min, K.-H. Kim, T.-Y. Kwon, Materials Letters 178 (2016) 300-303.
- [10] H. Wang, Q. Feng, N. Li, S. Xu, The Journal of Prosthetic Dentistry (2016), in press.
- [11] ครอบครัวข่าวสาม, ไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแล้ว, [http://www.krobkruakao.com], 2559 (สืบค้นวันที่ 31 ส.ค. 2559).
- [12] http://www.ipsr.mahidol.ac.th/ (สืบค้นวันที่ 31 ส.ค. 2559).
- [13] Mynametai, คนเคยป่วย-ผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม, [https://mynametai.wordpress.com], 2557 (สืบค้นวันที่ 31 ส.ค. 2559).
- [14] โรงพยาบาลบำรุงราษฎร์ [https://www.bumrungrad.com] (สืบค้นวันที่ 31 ส.ค. 59).
- [15] Cobalt Development Institute [http://www.thecdi.com/].
- [16] นิสา จันท์พวง, พลวัตกรรมในหลอดแก้วของกลาสเซรามิกที่มีเบตาแคลเซียมฟอสเฟต, ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550.

## ภาคผนวก

### เอกสารผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ในส่วนนี้จะ เป็นเอกสารผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย และได้ทำการเผยแพร่ในที่ประชุมวิชาการ 2 แห่ง และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการที่เป็นที่ยอมรับซึ่งมีทั้งหมด 1 ฉบับ ดังนี้

#### ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- (1) Kantapon Aimprakod, Phieraya Poolphol, Tosapol Maluangnont and **Wanwilai Vittayakorn**, “Process Development and Possibility of Cobalt-Chromium Alloys for Surgical Implant Applications Fabricated in Thailand”, The 43<sup>rd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT43), October 17-19, 2017, Bangkok, Thailand.
- (2) **Wanwilai Vittayakorn**, Phieraya Poolphol, Kantapon Aimprakod and Tosapol Maluangnont, “Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method”, The Second International Conference on Science and Technology of Emerging Materials (STEMa 2018), July 18-20, 2018, Pattaya, Thailand.

#### ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- (1) **Wanwilai Vittayakorn**, Phieraya Poolphol, Kantapon Aimprakod and Tosapol Maluangnont, “Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method”, Materials Today: Proceedings, 2018. (Article in press)



**Wanwilai Vittayakorn**

College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand  
e-mail: wanwilai.vi@kmitl.ac.th

**PROCESS DEVELOPMENT AND POSSIBILITY OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS FOR SURGICAL IMPLANT APPLICATIONS FABRICATED IN THAILAND**

Surgical implants (except plastic surgery) are around us: dental prosthetics, artificial knee, hip joints, and coronary stents. Surgical implants are particularly important to Thailand, which has already shifted to the ageing society and will be a full-fledged ageing society in 2031. Replacement surgery is among the best options for elderly patients. However, the expense for medical treatments is very high because all artificial implants are imported from other countries. The materials applicable for surgical implants must possess high strength, corrosion and wear resistance, bio-inertness and non-toxicity. Cobalt-chromium alloy is one of the most reliable materials; a chromium amount of higher than 25 wt% provides good mechanical and biological properties and high corrosion resistance to the alloy. Therefore, in this work, the cobalt-chromium (Co-Cr) alloy was fabricated via modified powder metallurgy method followed by sintering in an argon atmosphere. The Co-Cr pellets were formed by uniaxial pressing combined with cold isostatic pressing, aiming for high packing density. Microstructure, chemical compositions and surface morphology of all samples were investigated via scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) and atomic force microscopy (AFM), respectively. The biocompatibility of the Co-Cr alloys was investigated by immersing in simulated body fluid (SBF) for different times. The releasing ions were then examined by atomic absorption spectrophotometry (AAS). It was found that Co-Cr alloy showed the average density of 5.42 g/cm<sup>3</sup> or about 64.37% compared to theoretical density. Regarding biocompatibility, the leaching of Co increased with increasing immersion time whereas the leaching of Cr decreased. However, the levels of leached Co and Cr found in SBF for all conditions were still high. This result might be explained by poor densification of the alloys, allowing metal ions releases.

*Assistant Professor Dr. Wanwilai Vittayakorn (College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) received her Ph.D. in Materials Science from Chiang Mai University, Thailand in 2006. Her current researches are focused on electroceramics nanocomposites and advanced materials. The developments of synthesis, processing and fabrication of engineering materials and their microstructural design are important features of her work.*

## Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method

Wanwilai Vittayakorn<sup>1,\*</sup>, Phieraya Poolphol<sup>1</sup>, Kantapon Aimprakod<sup>1</sup> and  
Tosapol Maluangnont<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok, 10520 Thailand

\*corresponding author, E-mail: wanwilai.vi@kmitl.ac.th

### Abstract

Nowadays, Osteoarthritis is a critical disease in Thailand because it has already shifted to the ageing society and will be a full-fledged ageing society in 2031. Replacement surgery is among the best options for elderly patients. However, the expense for medical treatments is very high because all artificial implants are imported from other countries. The materials applicable for surgical implants must possess high strength, corrosion and wear resistance, bio-inertness and non-toxicity. Cobalt-chromium alloy is one of the most reliable materials; a chromium amount of higher than 25 wt% provides good mechanical and biological properties and high corrosion resistance to the alloy. Therefore, in this work, the cobalt-chromium (Co-Cr) alloy was fabricated via conventional powder metallurgy method followed by sintering in an argon atmosphere. The Co-Cr pellets were formed by uniaxial pressing combined with cold isostatic pressing, aiming for high packing density. Microstructure, chemical compositions and surface morphology of all samples were investigated via scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) and atomic force microscopy (AFM), respectively. The biocompatibility of the Co-Cr alloys was investigated by immersing in simulated body fluid (SBF) for different times. The releasing ions were then examined by atomic absorption spectrophotometry (AAS). All the results point out that all properties strongly depend on microstructure and densification of these alloys.

**Keywords:** Cobalt; Chromium; Powder metallurgy.



STEMa2018

## Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method

Wanwilai Vittayakorn<sup>a,\*</sup>, Phieraya Poolphol<sup>a</sup>, Kantapon Aimprakod<sup>a</sup> and Tosapol Maluangnont<sup>a</sup>

<sup>a</sup>College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

### Abstract

In this work, the cobalt–chromium (Co–Cr) alloy was fabricated via conventional powder metallurgy method followed by sintering in an argon atmosphere. The Co–Cr pellets were formed by uniaxial pressing combined with cold isostatic pressing, aiming for high packing density. Microstructure, chemical compositions and surface morphologies of all samples were investigated via scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) and atomic force microscopy (AFM), respectively. The biocompatibility of the Co–Cr alloys was investigated by immersing in simulated body fluid (SBF) for different times. The releasing ions were then examined by atomic absorption spectrophotometry (AAS). All the results point out that all properties strongly depend on microstructure and densification of these alloys. Furthermore, the appropriated condition for thermal treatment is performed to Co–Cr alloys in order to study the effect of thermal treatment on related properties. After thermal treatment process at 1200°C for 2 hours, it is found that the amount of pores in samples decreases due to thermal grain growth. For the biocompatibility, the results show that Co amount increases with increasing immersed days whereas Cr amount decreases. For thermal-treated samples, Co and Cr amounts are released to SBF higher than non-thermal-treated samples. The thermal treatment process allows Co–Cr alloys to have higher ductility and lower hardness, releasing a higher concentration of metal ions.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and peer-review under responsibility of The Second International Conference on Science and Technology of the Emerging Materials 2018, STEMa2018, 18th-20th July 2018, Pattaya, Thailand”

**Keywords:** Cobalt; Chromium; Powder metallurgy.

\* Corresponding author. Tel.: +66-2-329-8000; fax: +66-2-329-8265.

E-mail address: [wanwilai.vi@kmitl.ac.th](mailto:wanwilai.vi@kmitl.ac.th)

2214-7853 © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and peer-review under responsibility of The Second International Conference on Science and Technology of the Emerging Materials 2018, STEMa2018, 18th-20th July 2018, Pattaya, Thailand”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งที่ทางนี้ให้ด้วยก่อนที่เผยแพร่หรือแจกจ่ายให้ผู้อื่นซึ่งมีค่าธรรมเนียม  
This material is for personal use only. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without the prior written permission of the publisher. For more information, contact the publisher.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1. Introduction

Nowadays, Osteoarthritis is a critical disease in many countries because some of them have already shifted to the ageing society and will be a full-fledged ageing society soon. Replacement surgery is among the best options for elderly patients. However, the expense for medical treatments is very high because all artificial implants are imported from other countries. The materials applicable to surgical implants must possess high strength, corrosion and wear resistance, bio-inertness and non-toxicity. Cobalt-chromium alloy is one of the most reliable materials; a chromium amount of higher than 25 wt% provides good mechanical and biological properties and high corrosion resistance to the alloy [1]. Many researches have paid attention to this system because it is commonly used in dental and orthopedic implants [2, 3]. However, it has been reported that there are many problems during preparation processes related to unwanted intermediate phases from each end members, heterogeneous microstructure and densification behavior [4]. Thermal treatment is one of the most common methods to improve microstructure and properties of metals and alloys since phase evolution and microstructure development of alloys are strongly influenced by processing parameters. Many works have focused on the effect of various heat treatments on wear resistance, mechanical properties and microstructure of Co-based alloys and almost all cases have achieved better microstructure and could alter the mechanical properties. Morris *et al.* [5] studied the effect of heat treatment on the properties and microstructure of four base-metal alloys, i.e. Co-Cr, Fe-Cr, Co-Cr-Ni and Ni-Cr alloys. Their work reported that heat treatment of the partial denture alloys resulted in reductions in strength, while the elongations varied. Lee *et al.* [6] also studied the effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni- and C-Free Co-Cr-Mo alloys for medical applications. Four pre-heat treatments were conducted at 1170, 1200, 1230 and 1260 °C for three different time conditions: 2, 6 and 15 h and then water-cooled to room temperature. Their work found out that the tensile strength of alloys slightly decreased with increasing heat treatment temperature and heat treatment time, whereas the ductility slightly increased. Furthermore, the influence of heat treatment on the hardness of Co-Cr-Mo alloy was investigated by Mallik *et al.* [7]. Their results pointed out that the hardness of aged alloy was much variance on the same surface and the ageing temperature had only a little effect on the hardness but prolonged ageing affected in loss of hardness. In general, heat treatment of supersaturated solution can give rise to additional precipitations which modify the strength, hardness and ductility of the alloy. However, surprisingly, little information is available concerning the influence of thermal treatment on the chemical compositions, surface morphology and biocompatibility of these Co-based alloys.

Therefore, the purpose of this work is to fabricate the cobalt-chromium (Co-Cr) alloy via conventional powder metallurgy method followed by sintering in an argon atmosphere and to study the influence of thermal treatment on phase development, microstructural evolution, surface morphology and biocompatibility of the cobalt-chromium alloy.

## 2. Experimental procedure

The cobalt-chromium alloy with the formula of  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  was prepared by conventional powder metallurgy. Firstly, the commercial cobalt and chromium powders (> 99% purity, Aldrich Chemistry) were weighed and ball-milled with alumina media in ethanol for 24 h. Then, the slurry was dried in 80 °C-oven for 12 hours, ground into fine mixed powder and kept in the desiccator to prevent humidity from the air. To form the alloy pellets, the powder was weighed and mixed with a few droplets of 5 mol% polyvinyl alcohol (PVA) and ground until the powder and PVA were homogeneously mixed. Then, the mixed powder was pressed into 10 mm-of-diameters-pallets followed by the cold isostatic press (CIP) with 250 Pa for 5 min to improve the density of each sample. After that, the pellets were fired to eliminate the binder at 500 °C for 1 hour and sintered at 1300 °C for 2 hours in argon media with heating/cooling rates of 10 °C/min. Later on, all samples were polished with SiC paper to remove dirtiness on the surface. Microstructure, chemical compositions and surface morphology of all samples were investigated. After that, the sintered Co-Cr pellets were fired again at 1200 °C for 2 hours in argon media with heating/cooling rates of 10 °C/min, in order to study the effect of thermal treatment on related properties. Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) and scanning electron microscope (SEM) were selected to study the chemical composition and microstructural evolution of these alloys. Surface morphology of bulk samples was characterized by atomic force microscopy (AFM). For both pre- and post- thermal treatment, the samples were immersed in simulated body fluid

(SBF) for several days at room temperature. The releasing ions were examined via atomic absorption spectrophotometry (AAS).

### 3. Results and discussion

The microstructures of  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  alloys before and after thermal treatment at 1200 °C for 2 hours in an argon atmosphere with heating/cooling rates of 10 °C/min are revealed by scanning electron microscopy as shown in Fig. 1. It is seen that many pores distribute throughout over the surface for pre-thermal treatment-sample (Fig. 1(a)). For post-thermal treatment, porosity seems to decrease (Fig. 1(b)). Normally, the heat-treating process is a common method to relieve or reduce internal stress which has accumulated during prior manufacturing processes in both ferrous and non-ferrous alloys. The treatment does not significantly change in material structures or mechanical properties. However, the energy from the heating process can be used to decrease the internal surface area of those pores which resulted in minimize porosity for the post-thermal treatment alloy [8], as clearly seen in Fig. 1.

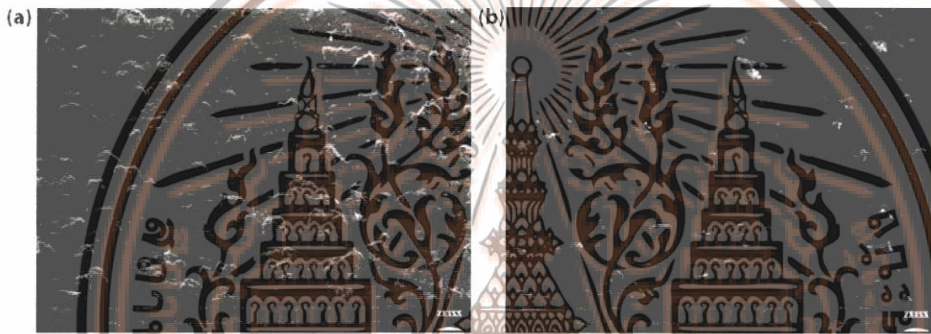


Fig. 1. SEM images of microstructure for (a) pre-; (b) post- thermal treatment of  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  alloys.

The atomic force microscopy is used to investigate the surface topography for both pre- and post- thermal treatment of  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  alloys and the images shown in Fig. 2. It can be seen that the surfaces are not very different in both case, a flat microstructure combined with a lot of bumps all over the surface. However, with careful observation, the post-thermal treated sample seems to show smoother surface. The average and RMS roughness of pre-thermal treated alloy are about 15.5 and 20.4 nm, respectively, whereas those values are about 7.5 and 9.5 nm for post-thermal treated alloy. Moreover, the post-thermal treated alloy looks more dense and compact than another one, which can assume that this is the consequence from thermal treatment process conformed to previous researches [9, 10].

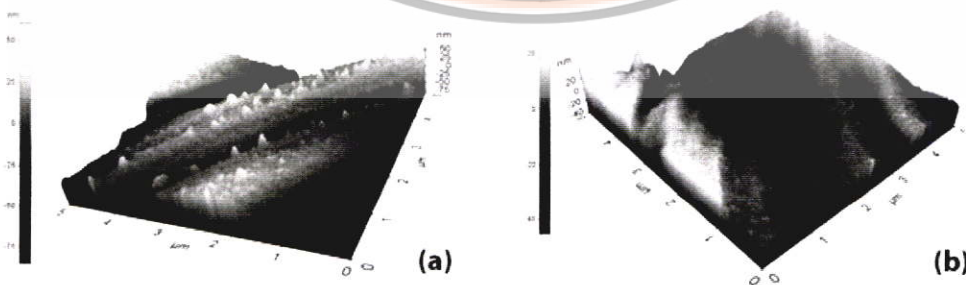


Fig. 2. AFM images of surface morphology for (a) pre-; (b) post- thermal treatment of  $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{30}$  alloys.

The EDX mapping and element analysis for both pre- and post- thermal treatment of  $Co_{70}Cr_{30}$  alloys are shown in Figs. 3 and 4, respectively. The Co and Cr amounts are not different even before or after thermal treatment which confirms that the treatment does not change the chemical composition of this alloy. For the element mapping, the green color represents the existence of cobalt element and the red color represents the existence of chromium element. The result also suggests that the elements of Co and Cr are homogeneously distributed over the whole samples, as shown in Figs. 3 and 4.

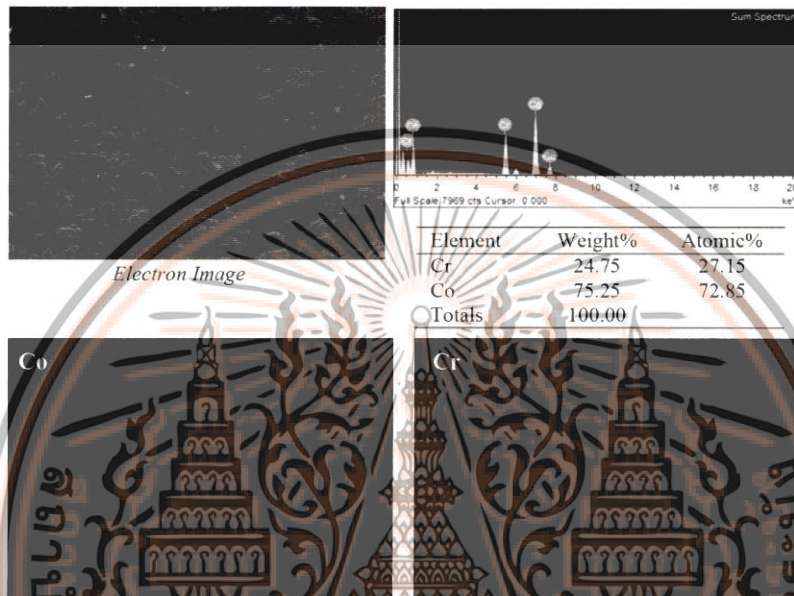


Fig. 3. EDX spectrum and element mapping of pre-thermal treatment of  $Co_{70}Cr_{30}$  alloy.

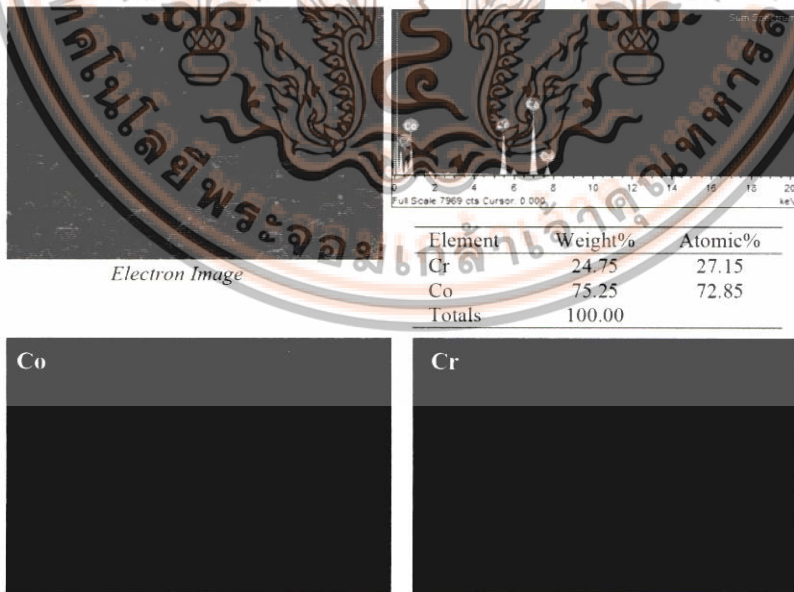


Fig. 4. EDX spectrum and element mapping of post-thermal treatment of  $Co_{70}Cr_{30}$  alloy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ต่อบุคคลอื่นจนพ้องหรือต้องแจ้งถึงเจ้าของข้อมูลก่อนนำข้อมูลไปใช้  
 This material is reserved for educational use only. Not allowed for commercial use.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

The results of metal ion (Co and Cr) releasing from the pre- and post- thermal treated alloys immersed in simulated body fluid (SBF) solution, a solution which contains the ion concentration close to that of human blood plasma, for various days are shown in Figs. 5 and 6. Differences are found in the release of cobalt and chromium ions during the successive times in the solutions. The releasing of Co ion (Fig. 5) continuously increases with increasing immersed time for both pre- and post- thermal treatment. On the other hand, Cr ion releasing seems to decrease with times. The reason that Cr released content is lower and decreases with immersing time is mainly from the lower beginning concentration of this metal compared with another and Cr also has higher hardness than Co [11]. For both ions, the post-thermal treated samples show higher releasing amounts in all conditions. This can be explained that the thermal treatment process allows Co – Cr alloy to relieve the internal stress, minimize porosity, exhibit higher ductility and lower hardness, therefore, all metal ions easily release.

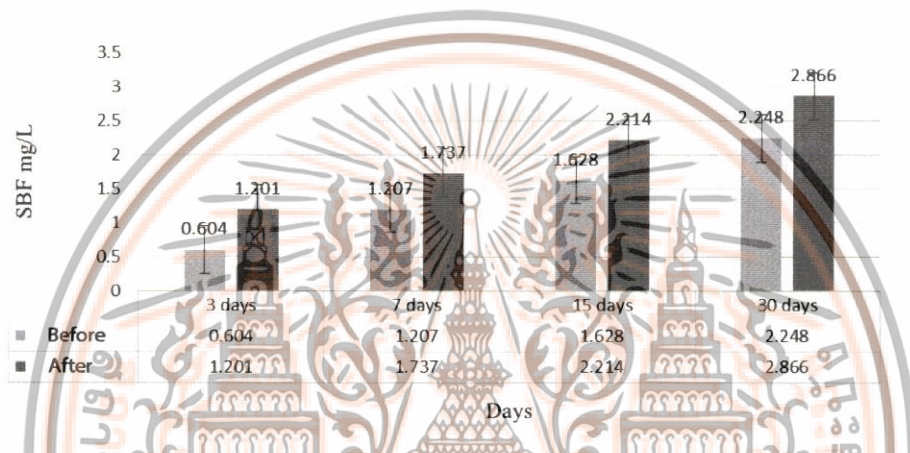


Fig. 5. The Co ion releasing in SBF solution before and after thermal treatment for Co<sub>70</sub>Cr<sub>30</sub> alloys.



Fig. 6. The Cr ion releasing in SBF solution before and after thermal treatment for Co<sub>70</sub>Cr<sub>30</sub> alloys.

**4. Conclusion**

This work mainly studies the fabrication of the cobalt–chromium (Co-Cr) alloy via conventional powder metallurgy method followed by sintering in an argon atmosphere. The thermal treatment is used to develop preparation processing by re-heated at 1200 °C for 2 hours. The results show that the porosity and surface roughness of post-thermal treated sample decrease due to the stress relieving and thermal grain growth. For the biocompatibility, the Co amount increases with increasing immersed days whereas Cr amount decreases. The post-

thermal treated samples show higher releasing amounts in all conditions. This is because the thermal treatment process allows Co – Cr alloys to have higher ductility and lower hardness, releasing a higher concentration of metal ions.

**Acknowledgements**

This work is supported by National Research Council of Thailand (NRCT), College of Nanotechnology Ladkrabang and KMITL Research Fund.

**References**

- [1] K. Ishida, T. Nishizawa, Bulletin of Alloy Phase Diagrams 11 (1990) 357-370.
- [2] M.C. Lucchetti, G. Fratto, F. Valeriani, E. De Vittori, S. Gianpaoli, P. Papetti, V. Romano Spica, L. Manzon, The Journal of Prosthetic Dentistry 114 (2015) 602-608.
- [3] R. Liu, S.Q. Xi, S. Kapoor, X.J. Wu, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences 5 (2010) 110-122.
- [4] D.J.S. Hyslop, A.M. Abdelkader, A. Cox, D.J. Pray, Acta Materialia 58 (2010) 3124-3130.
- [5] H.F. Morris, K. Asgar, A.P. Rowe, C.E. Nasjleti, The Journal of Prosthetic Dentistry 41 (1979) 388-395.
- [6] S.-H. Lee, E. Takahashi, N. Nomura, A. Chiba, MATERIALS TRANSACTIONS 46 (2005) 1790-1793.
- [7] M.K. Mallik, C.S. Rao, V.V.S. Kesava rao, Procedia Engineering 97 (2014) 1718-1723.
- [8] A.S. Poyraz, C.-H. Kuo, S. Biswas, C.K. King'ondo, S.L. Subb, Nature Communications 4 (2013) 2952.
- [9] F. Kahraman, A. Sagbas, An Investigation of the Effect of Heat Treatment on Surface Roughness in Machining by using Statistical Analysis, 2010, p. 591-595.
- [10] Z. Li, C. Liu, B. Wang, C. Wang, Z. Wang, F. Yang, C. Gao, H. Liu, Y. Qin, J. Wang, RSC Advances 8 (2018) 12471-12483.
- [11] G.V. Samsonov, Mechanical Properties of the Elements. in: G.V. Samsonov (Eds), Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements, Springer, Boston, 1968, pp. 387-446.





ระยะเวลา: 1 ปี

- (5) ทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2551 งบประมาณ: 100,000 บาท ระยะเวลา: 1 ปี
- (6) ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2552 จากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (CHE-TRF) งบประมาณ: 480,000 บาท ระยะเวลา: 2 ปี
- (7) ทุนอุดหนุนการวิจัยจากดอกผลกองทุนคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2552 งบประมาณ: 50,000 บาท ระยะเวลา: 1 ปี
- (8) ทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2552 งบประมาณ: 100,000 บาท ระยะเวลา: 1 ปี
- (9) ทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการร่วมระหว่างศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และเครือข่ายความเป็นเลิศด้านวัสดุนาโนที่ทำหน้าที่เฉพาะทาง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2553 งบประมาณ: 80,000 บาท ระยะเวลา: 10 เดือน
- (10) ทุนพัฒนานักวิจัย กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2555 งบประมาณ: 1,000,000 บาท ระยะเวลา: 2 ปี
- (11) ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี พ.ศ. 2557 งบประมาณ: 500,300 บาท ระยะเวลา: 1 ปี
- (12) ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี พ.ศ. 2558 งบประมาณ: 495,000 บาท ระยะเวลา: 1 ปี
- (13) ทุนพัฒนานักวิจัย กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2558 งบประมาณ: 1,000,000 บาท ระยะเวลา: 2 ปี
- (14) ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี พ.ศ. 2560 งบประมาณ: 490,000 บาท ระยะเวลา: 1 ปี

## 6.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ. 2012 – 2018)

- (1) U. Sukkha, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom, **W. C. Vittayakorn** and N. Vittayakorn, "Effect of  $\text{Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  on Phase Transition and Thermal and Electrical Properties of PZ-PYbN Solid Solution on PZ-rich Side", *Journal of Materials Science*, **47**, 1452-1459 (2012). (impact factor 2.163)
- (2) C. Nawani, B. Boomchom, J. Prachayawarakorn, **W. C. Vittayakorn** and N.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ลงในสื่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 This material is for personal use only. It is not to be used for commercial purposes.  
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Lead Zirconate (PbZrO<sub>3</sub>) Nanofibers”, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, **177**, 1009-1016 (2012). (impact factor 1.846)
- (3) U. Sukkha, **W. C. Vittayakorn**, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and N. Vittayakorn, “Phase Transition Behavior of the (1-x)PbZrO<sub>3</sub>-xBa(Al<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> Solid Solution”, *Journal of the American Ceramic Society*, **95**, 3151-3157 (2012). (impact factor 2.107)
- (4) **W. C. Vittayakorn**, D. Banjong and N. Vittayakorn, “Processing and Characterizations of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BaTiO<sub>3</sub> Ceramic”, *Advanced Materials Research*, **802**, 7-11 (2013).
- (5) **W. C. Vittayakorn**, N. Pulphol, R. Roongtao, R. Muanghlua and N. Vittayakorn, “The Influence of BMN Addition on the Phase Formation, Microstructure and Dielectric Property of BaTiO<sub>3</sub> Ceramic”, *Ferroelectrics*, **451**, 15-21 (2013). (impact factor 0.415)
- (6) **W. C. Vittayakorn**, N. Pulphol, R. Muanghlua and N. Vittayakorn, “Fabrication and Properties of BaTiO<sub>3</sub>-CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites”, *Integrated Ferroelectrics*, **148**, 153-160 (2013). (impact factor 0.375)
- (7) P. Charoonsuk, **W. Vittayakorn**, R. Muanghlua, B. Boonchom, S. Niemcharoen and N. Vittayakorn, “Aqueous Co-precipitated Spherical Shape PbZrO<sub>3</sub> Nanopowders: Perovskite Phase Formation”, *Ceramics International*, **39**, S107-S111 (2013). (impact factor 1.789)
- (8) C. Nawani, **W. Vittayakorn**, J. Prachayawarakorn and N. Vittayakorn, “Preparation and Dielectric Properties of 3-3 Lead Zirconate/Polyvinylidene Fluoride Nanocomposite”, *Ferroelectrics Letters*, **40**, 94-100 (2013). (impact factor 0.613)
- (9) P. Charoonsuk, R. Baitahe, **W. Vittayakorn**, N. Atiwongsangthong, R. Muanghua, P. Seeharaj and N. Vittayakorn, “Synthesis of Monodispersed Perovskite Barium Zirconate (BaZrO<sub>3</sub>) by the Sonochemical Method”, *Ferroelectrics*, **453**, 54-61 (2013). (impact factor 0.415)
- (10) R. Roongtao, R. Baitahe, N. Vittayakorn, W. Klysubun and **W. C. Vittayakorn**, “Structural and Magnetic Properties of Zn Doped CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>”, *Integrated Ferroelectrics*, **148**, 145-152 (2013). (impact factor 0.375)

- (11) N. Jaitanong, **W. C. Vittayakorn**, H. R. Zeng, Q. R. Yin, R. Yimnirun and A. Chaipanich, “Piezoelectric Properties and Domain Configurations of PZT Ceramic with NiO Addition”, *Integrated Ferroelectrics*, **149**, 95-101 (2013). (impact factor 0.375)
- (12) S. Vuttivong, S. Niemcharoen, P. Seeharaj, **W. C. Vittayakorn** and N. Vittayakorn, “Sonochemical Synthesis of Spherical BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles” *Ferroelectrics*, **457**, 44-52 (2013). (impact factor 0.415)
- (13) U. Sukkha, **W. Vittayakorn**, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, A. Karbkaew, P. Seeharaj and N. Vittayakorn, “Effect of Pb(Ni<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> on the Phase Transition Behavior of PbZrO<sub>3</sub> Ceramic”, *Ferroelectrics*, **451**, 30-40 (2013). (impact factor 0.415)
- (14) C. Nawani, **W. Vittayakorn**, R. Muanghua, S. Niemcharoen, J. Prachayawarakorn and N. Vittayakorn, “The Effect of Thai Glutinous Rice Starch on the Synthesis of Lead Zirconate (PbZrO<sub>3</sub>) Nanofibers via the Electrospinning Method”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **13**, 3700-3704 (2013) (impact factor 1.149)
- (15) N. Pulphol, R. Muanglua, S. Niemcharoen, W. Pecharapa, **W. C. Vittayakorn** and N. Vittayakorn, “Magnetoelectric Properties of BaTiO<sub>3</sub>-Co<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Composites Prepared by the Conventional Mixed Oxide Method”, *Advanced Materials Research*, **802**, 22-26 (2013).
- (16) S. Wirunchit, R. Muanghlua, N. Atiwongsangthong, **W. C. Vittayakorn** and N. Vittayakorn, “Nanocrystalline Barium Zirconium Titanate Synthesized by the Sonochemical Process”, *Advanced Materials Research*, **802**, 119-123 (2013).
- (17) M. Sutapun, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, **W. C. Vittayakorn**, P. Seeharaj and N. Vittayakorn, “Synthesis, Characterization and Dielectric Properties of Mn<sub>(2-x)</sub>Zn<sub>x</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Ceramics”, *Advanced Materials Research*, **802** 12-16 (2013).
- (18) R. Roongtao, R. Baitahe, N. Vittayakorn, P. Seeharaj and **W. C. Vittayakorn**, “Influence of Mn Doping on the Magnetic Properties of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>”, *Ferroelectrics*, **459**, 119-127 (2014). (impact factor 0.415)
- (19) U. Sukkha, **W. C. Vittayakorn**, R. Muanghlua, S. Niemcharoen and N. Vittayakorn, “Effect of A-site and B-site ion replaced with small ions on the intermediate phase in PbZrO<sub>3</sub> ceramic”, *Materials Chemistry and Physics*, **143**, 1517-1521 (2014). (impact factor 2.072)

- (20) N. Pulphol, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, N. Vittayakorn and **W. Vittayakorn**, Fine Grain  $\text{BaTiO}_3\text{-Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  Ceramics Prepared by the Two-Stage Sintering Technique, *Ferroelectrics*, **489**, 1–11, 2015. (impact factor 0.415)
- (21) R. Roongtao, N. Vittayakorn, W. Klysubun and **W. C. Vittayakorn**, Effect of Annealing Time on the Cation Distribution in Mn Doped  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , *Ferroelectrics*, **492**, 43–53, 2016. (impact factor 0.415)
- (22) N. Poolphol, T. Maluangnont, and **W. Vittayakorn**, Effect Of Irradiated Time On Phase Formation And Crystallite Size Of Multiferroic  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$  Nanopowder Prepared By Sonochemical Method, *Integrated Ferroelectrics*, **177**, 1-9, 2017. (impact factor 0.375)
- (23) N. Poolphol, T. Sakkaew, K. Kachin, P. Jantaratana and **W. Vittayakorn**, Physical, Mechanical and Magnetic Properties of Cobalt-Chromium Alloys Prepared by Conventional Processing, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 6358-6364, 2017.
- (24) S. Kongsabay and **W. Vittayakorn**, “Process development and its characteristics of barium titanate/epoxy resin nanocomposites,” in AIP Conference Proceedings, 2018, pp. 020031-1–020031-6.
- (25) **W. Vittayakorn**, P. Poolphol, K. Aimprakod and T. Maluangnont, “Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method,” in *Materials Today: Proceedings*, 2018. (Accepted)