

ความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316  
ที่เคลือบผิวด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์  
BIOACTIVITY OF STRAINLESS STEEL AISI 304 AND AISI 316 COATED  
WITH HYDROXYAPATITE

วรรณณา หอมจะบก<sup>1</sup> และ นวลละออง สระแก้ว<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลอีสาน 744 ถ. สุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000,  
<sup>1</sup>whomjabok@hotmail.com, <sup>2</sup>n\_srakaew@hotmail.com

Wanna Homjabok<sup>1</sup> and Nuan La-ong Srakeaw<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Lecturer, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Technology,  
Rajamangala University of Technology Isan, 744, Suranarai Road, Muang,  
Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand,  
<sup>1</sup>whomjabok@hotmail.com, <sup>2</sup>n\_srakaew@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ที่เคลือบผิวด้วยวิธีการพ่นเคลือบโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการเผาผืนที่อุณหภูมิ 900 °C ผลการทดลองพบว่าค่าความขรุขระของพื้นผิวมีค่าความขรุขระมากขึ้นเมื่อทำการเคลือบผิว โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีค่าความขรุขระมากกว่า AISI 304 และเมื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำโดยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวจะมีมุมสัมผัสมากกว่า 90° แสดงสมบัติไฮโดรโฟบิก และจากการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ที่เคลือบผิวด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และเผาผืนมีความว่องไวทางชีวภาพดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 และ AISI 304 ที่เคลือบผิวทั้งสองเกรดต่างก็พบการเกิดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เป็นรูปแบบของแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งแสดงถึงความว่องไวทางชีวภาพที่ดีและมีโอกาสที่จะก่อตัวเป็นกระดูกได้

คำสำคัญ: เหล็กกล้าไร้สนิม, ไฮดรอกซีอะพาไทต์, ความว่องไวทางชีวภาพ

## ABSTRACT

This research aims to study the bioactivity of stainless steel AISI 304 and AISI 316 coated with hydroxyapatite using spraying method. After being coated, the samples were sintered at 900 °C. The results showed that the surface roughness value increased when coating procedure. The AISI 316 stainless steel has a higher roughness than AISI 304 and when used to test the hydrophobic and hydrophobic properties by measuring the contact angle of water droplets on the surface. The coated sample have a contact angle greater than 90°, showing hydrophobic properties. The bioactivity test showed that AISI 316 stainless steel coated with hydroxyapatite and sintered showed better bioactivity than AISI 304 stainless steel. However, both grades of coated stainless steel AISI 316 and AISI 304 exhibit hydroxyapatite crystallization in the form of calcium phosphate. Which shows good biological compatibility and the potential for bone formation.

**KEYWORDS:** stainless steel, hydroxyapatite, bioactivity

### 1. บทนำ

วัสดุทางการแพทย์ (Medical materials) สามารถแยกความหมายหรือแบ่งประเภทได้ 2 แบบด้วยกัน คือวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) และวัสดุทางชีววิทยา (Biological materials) คำว่า Biomaterials นั้นมีความหมายว่า เป็นวัสดุอย่างหนึ่งอย่างใดที่นำเข้าไปฝังอยู่ในร่างกาย เพื่อทำหน้าที่เป็นอวัยวะเทียมหรือเพื่อรักษาบางอย่าง หรือเรียกได้ว่าเป็น “วัสดุชีวภาพ” ส่วนคำว่า Biological materials เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเยื่อของร่างกายตามธรรมชาติ เรียกว่า “วัสดุทางชีววิทยา” [1]

วัสดุศาสตร์มีบทบาทสำคัญต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ประเภทต่าง ๆ โดยมีนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการรักษาทดแทนแก้ไข ปัญหาต่าง ๆ ในการรักษาโรค เช่น คอนแทคเลนส์ กระดูกเทียม ข้อต่อเทียม แขนเทียม ขาเทียม ลิ้นหัวใจเทียม หลอดเลือดเทียม และที่ครอบฟัน เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับร่างกายหรืออวัยวะเหล่านี้จะเรียกว่า วัสดุชีวภาพ (Biomaterials)

ปัจจุบันวัสดุชีวภาพมีมากมายหลายชนิดทั้งที่ผลิตจาก โลหะ พอลิเมอร์ เซรามิก และวัสดุผสมที่สามารถนำมาใช้ซ่อมแซมหรือทดแทนเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายในร่างกายมนุษย์ ซึ่งวัสดุทางด้านชีวภาพที่ใช้ในทางการแพทย์มีวิวัฒนาการทางด้านวัสดุเป็นอย่างมากตลอดระยะเวลากว่า 20 ปีที่ผ่านมา โดยวัสดุที่สามารถนำมาใช้กับร่างกายมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตมีอยู่หลายชนิด เช่น แก้วเซรามิก ชีวภาพ เรซินคอมโพสิต และเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งเน้นถึงการทดสอบคุณภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เพราะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี นอกจากนี้ยังมีราคาถูกและขึ้นรูปได้ง่ายกว่าวัสดุประเภทอื่น งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) เพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น AISI 316L [2] และ AISI 304 [3] เป็นต้น

การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ เป็นการจำลองสภาวะทางชีวภาพของร่างกายในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยวัสดุชีวภาพที่นิยมทำการศึกษาคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HA) เพราะไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับกระดูกและฟันที่มีอยู่ในธรรมชาติ และมีสมบัติความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของมนุษย์ เจือต่อการเกิดปฏิกิริยาสารเคมีในร่างกายและเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต อีกทั้งยังสามารถสลายตัวได้ในร่างกายสิ่งมีชีวิต เมื่อมีการเจริญของเนื้อเยื่อหรือกระดูกเข้ามาแทนที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับร่างกาย ทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาศึกษาเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุแทนกระดูกจากนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่ม [4-6]

ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูกสิ่งมีชีวิตสามารถใช้เป็นสารทดแทนกระดูกให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยและทนต่อของเหลวภายในร่างกายซึ่งมีความเป็นกรดได้ โดยสามารถเตรียมสารได้จาก 3 แหล่ง คือ 1) จากสารเคมี เช่น แคลเซียมไนเตรดและแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น 2) จากปะการัง แต่เนื่องจากปะการังมีปริมาณน้อยและเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงไม่นิยมนำมาใช้ และ 3) จากกระดูกสัตว์ โดยมากนิยมใช้กระดูกโคและกระบือมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณมากและเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์ทั้งการใช้แรงงานและการบริโภค [7]

สารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (Simulated body fluid, SBF) เป็นสารละลายที่เตรียมขึ้นมาให้มีปริมาณความเข้มข้นของไอออนที่ใกล้เคียงกับพลาสมาในเลือดของมนุษย์ [8] เพื่อใช้สำหรับทดสอบความเป็นไบโอแอคติวิตีของวัสดุโดยสารละลาย SBF แต่ละตัวจะมีปริมาณไอออนต่าง ๆ ได้แก่  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  [9]

จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวไว้ข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกโดยทำการประยุกต์เข้ากับสารไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีการพ่นเคลือบ (Spray coating) ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ใช้อุปกรณ์ในกระบวนการน้อย และราคาถูก (โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้วิธีการพ่นแบบพลาสมา (Plasma spraying) [10, 11])

โดยวิธีการทดสอบจะนำวัสดุมาทดลองในสภาวะจำลองทางชีวภาพของร่างกายมนุษย์แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุนั้นทั้งด้านเคมี ด้านกายภาพ และโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมี

สมมติฐานว่าจะสามารถทำการเคลือบผิวด้วยวิธีดังกล่าวได้ โดยมีตัวแปรการทดลองคือชิ้นงาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ที่ทำและไม่ทำการเคลือบผิวและเผาผืนึก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะช่วยในการทำนายผลโดยสามารถนำมาเปรียบเทียบได้กับความปลอดภัย ต่อร่างกายของมนุษย์และเนื้อเยื่อร่างกายเรียกว่า วิธีการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีความแม่นยำและมีเกณฑ์การวัดคุณภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะสามารถนำวัสดุไปต่อยอดในการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในร่างกายมนุษย์ได้

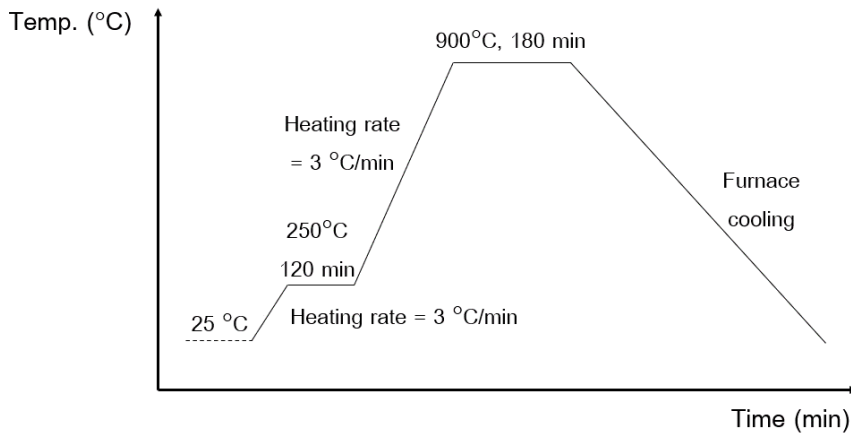
## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 หนา 3 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร และยาว 10 มิลลิเมตร นำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 240, 320 และ 600 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการเคลือบผิวด้วยกรดอะซิติก Grade AR ความเข้มข้น 99.8% (QRc New Zealand) ที่ผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ความเข้มข้น 17.5 มิลลิโมลต่อลิตร โดยการฉีดพ่นสารด้วยวิธีสเปรย์ที่ระยะห่างจากชิ้นงานโดยประมาณ 5 เซนติเมตร จำนวน 5 ครั้ง จนครบทุกด้านของผิวชิ้นงาน แล้วจึงทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่นำมาใช้ในการทดลองถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) แล้วทำการคัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาด 325 mesh ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 45  $\mu\text{m}$

### 2.2 กระบวนการเผาผืนึกด้วยความร้อน

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้นมาเผาผืนึก โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 25 °C แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 1.5 °C/นาที จนถึง 250 °C คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 900 °C ด้วยอัตรา 3 °C/นาที และคงอุณหภูมิ 900 °C นี้ไว้เป็นเวลา 180 นาที ซึ่งการใช้อุณหภูมิสูงจะส่งผลการเผาผืนึกมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่หากใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 900 °C จะทำไฮดรอกซีอะพาไทต์เปลี่ยนเฟสไปเป็นออกซีอะพาไทต์ (Oxyapatite, OXA) [12] จากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเผาพริกด้วยความร้อน

## 2.3 การทดสอบและตรวจสอบ

### 2.3.1 การทดสอบความขรุขระผิวและการทดสอบวัดค่ามุมสัมผัสน้ำ

การทดสอบความขรุขระผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ยี่ห้อ Nanosurf C3000 (Nanosurf FlexAFM system, Switzerland) และการวัดค่ามุมสัมผัสน้ำ (Contact angle) ของตัวอย่าง โดยการหยดน้ำ DI (Deionized) ปริมาตร 0.5  $\mu\text{L}$  บนผิวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิทดสอบ  $20 \pm 1$  °C ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)  $45 \pm 2\%$  ด้วยเครื่อง Contact angle measurement [13]

### 2.3.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ

การทดสอบไบโอแอคทีวิตีในหลอดแก้ว หรือความว่องไวทางชีวภาพ (In vitro bioactive) จะใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีผ่านการฉีดยาด้วยสเปรย์และกระบวนการเผาพริก โดยใช้ชิ้นงานลงในขวดพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) สีนํ้าตาลทึบเพื่อป้องกันแสงเข้าไปบริเวณ ขนาดบรรจุ 60 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมสารละลาย Simulate body fluid (SBF) ซึ่งปริมาณสารละลาย SBF ที่ใส่ลงไปในแต่ละขวดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\text{พื้นที่ผิวสัมผัทั้งหมดของชิ้นงาน}}{\text{ปริมาณสารละลาย}} = 0.1 \text{ cm}^{-1} \quad (1)$$

ทำการควบคุมขวดทดลองที่บรรจุชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิ  $37 \pm 1$  °C เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดนำชิ้นตัวอย่างออกมาล้างด้วยน้ำ DI และแช่ Ethanol เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งไว้ให้แห้งใน

ตู้ดูดควันไอสารเคมี (Hood) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์ผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning electron microscope, FE-SEM) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Auriga

### 3 ผลการวิจัย

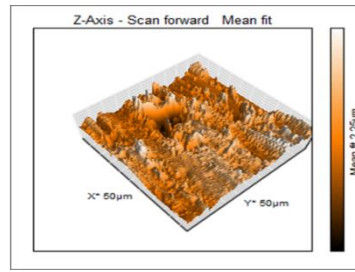
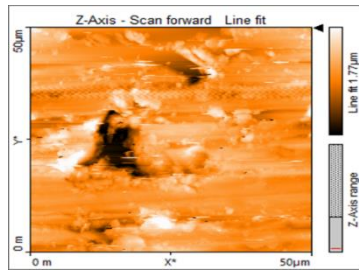
ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ เกรด AISI 304 และ AISI 316 ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) โดยผลที่ได้พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) 0.057%, โครเมียม (Cr) 18.62%, นิกเกิล (Ni) 8.06% และโมลิบดีนัม (Mo) 0.099% เป็นต้น ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีธาตุที่สำคัญที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) 0.046%, โครเมียม (Cr) 16.93%, นิกเกิล (Ni) 10.02% และ โมลิบดีนัม (Mo) 2.037% เป็นต้น

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316

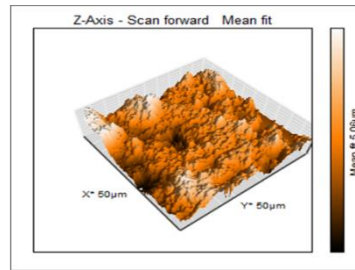
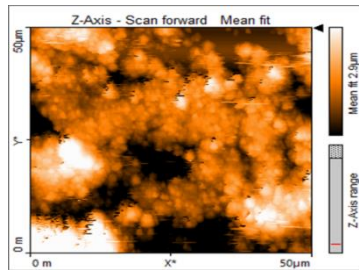
ชนิด	ปริมาณธาตุ (wt%)						
	Cr	Ni	Mo	C	P	S	Fe
AISI 304	18.62	8.06	0.099	0.057	0.041	0.021	bal.
AISI 316	16.93	10.02	2.037	0.046	0.035	0.020	bal.

#### 3.1 ผลการทดสอบความขรุขระผิวด้วยเทคนิค AFM

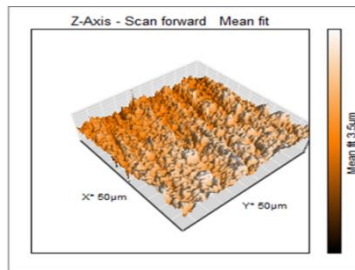
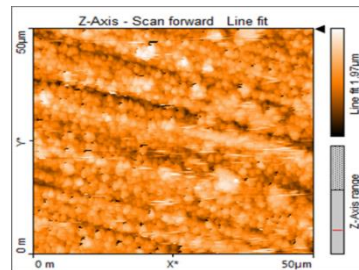
การทดสอบความขรุขระผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 โดยรูปที่ 2 ได้แสดงผลของการทดสอบความขรุขระของชิ้นงานทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว (Uncoated) และทำการเคลือบด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และเฉพาเน็ก (Coated) พบว่า ก่อนทำการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดมีค่าความขรุขระผิวใกล้เคียงกัน โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) 156.87 nm (SD = 1.59 nm) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) 208.58 nm (SD = 12.54 nm) เมื่อการเคลือบผิวและเฉพาเน็กส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) 710.34 nm (SD = 66.53 nm) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) 1,455.93 nm (SD = 50.24 nm) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 เกรด มีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ หลังจากผ่านการเคลือบผิวและเฉพาเน็กแล้ว ชิ้นงานจะมีค่าความขรุขระผิวสูงขึ้น โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 จะมีความขรุขระที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



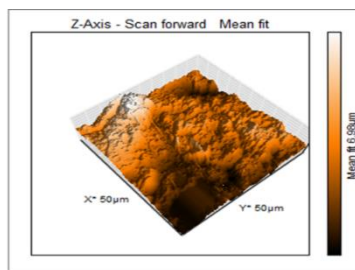
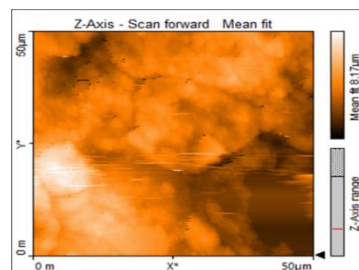
ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ( $Ra_{เฉลี่ย} = 156.87 \text{ nm}$  ( $SD = 1.59 \text{ nm}$ ))



ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ทำการเคลือบผิว ( $Ra_{เฉลี่ย} = 710.34 \text{ nm}$  ( $SD = 66.53 \text{ nm}$ ))



ค) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ( $Ra_{เฉลี่ย} = 208.58 \text{ nm}$  ( $SD = 12.54 \text{ nm}$ ))



ง) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ที่ทำการเคลือบผิว ( $Ra_{เฉลี่ย} = 1,455.93 \text{ nm}$  ( $SD = 50.24 \text{ nm}$ ))

รูปที่ 2 ความขรุขระผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ AISI 316



### 3.2 ผลการทดสอบวัดมุมสัมผัสน้ำด้วยเทคนิค Contact angle

ผลการทดสอบมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ AISI 316 ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวและเผาผนึก จะมามีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $84.30^{\circ}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและเผาผนึกซึ่งมีมุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $106.12^{\circ}$  ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวและเผาผนึก จะมามีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $99.69^{\circ}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและเผาผนึกซึ่งมีมุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $116.41^{\circ}$  แสดงให้เห็นว่าทั้งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์และเผาผนึก จะแสดงพฤติกรรมหรือสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ โดยมีมุมสัมผัสมากกว่า  $90^{\circ}$

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำร่วมกับผลของการทดสอบความขรุขระผิวพบว่า ชิ้นงานที่มีความขรุขระมากจะมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำมากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของกลุ่มงานวิจัยหลาย ๆ กลุ่ม [14, 15] เหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า ความขรุขระที่เกิดขึ้นหลังการเคลือบผิวเกิดจากอนุภาคที่อยู่ในสารเคลือบ และเมื่อน้ำมีการสัมผัสกับผิวที่มีความขรุขระนี้จะเกิดการสะสมของอากาศ (Air trapping) ส่งผลให้ปริมาณพื้นผิวที่น้ำสัมผัสกับพื้นผิวที่เคลือบ (Water-solid interface) มีค่าลดลง หรือมีค่ามุมสัมผัสพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง [16, 17]

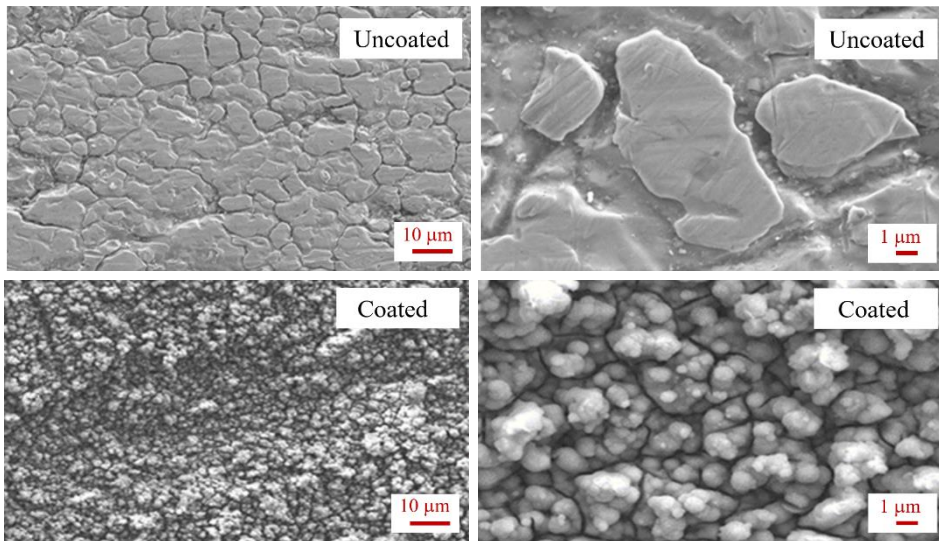
ตารางที่ 2 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316

เกรด		ภาพหยดน้ำ			มุม
AISI 304	Uncoated				$84.30^{\circ}$ (SD=6.83 $^{\circ}$ )
	Coated				$106.12^{\circ}$ (SD=2.02 $^{\circ}$ )
AISI 316	Uncoated				$99.69^{\circ}$ (SD=1.73 $^{\circ}$ )
	Coated				$116.41^{\circ}$ (SD=0.58 $^{\circ}$ )

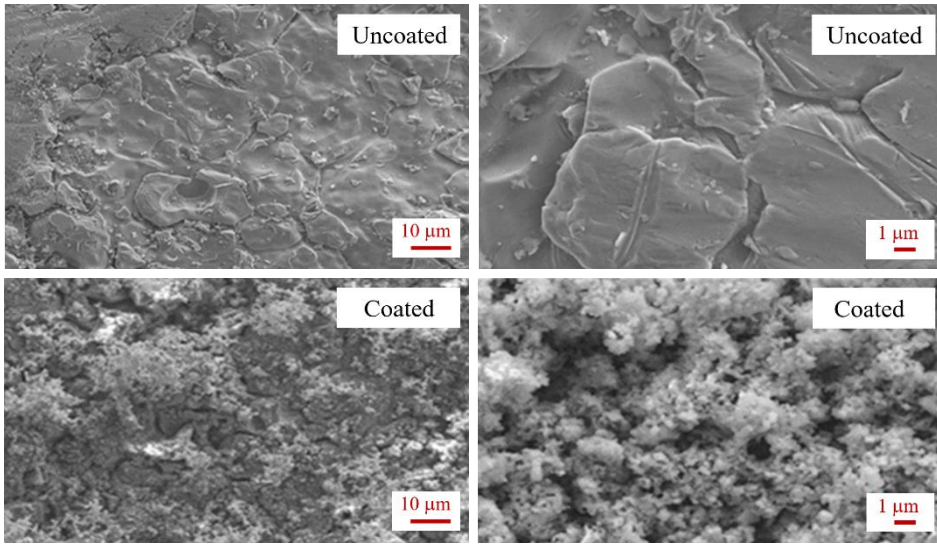


### 3.3 ผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ (In vitro bioactive)

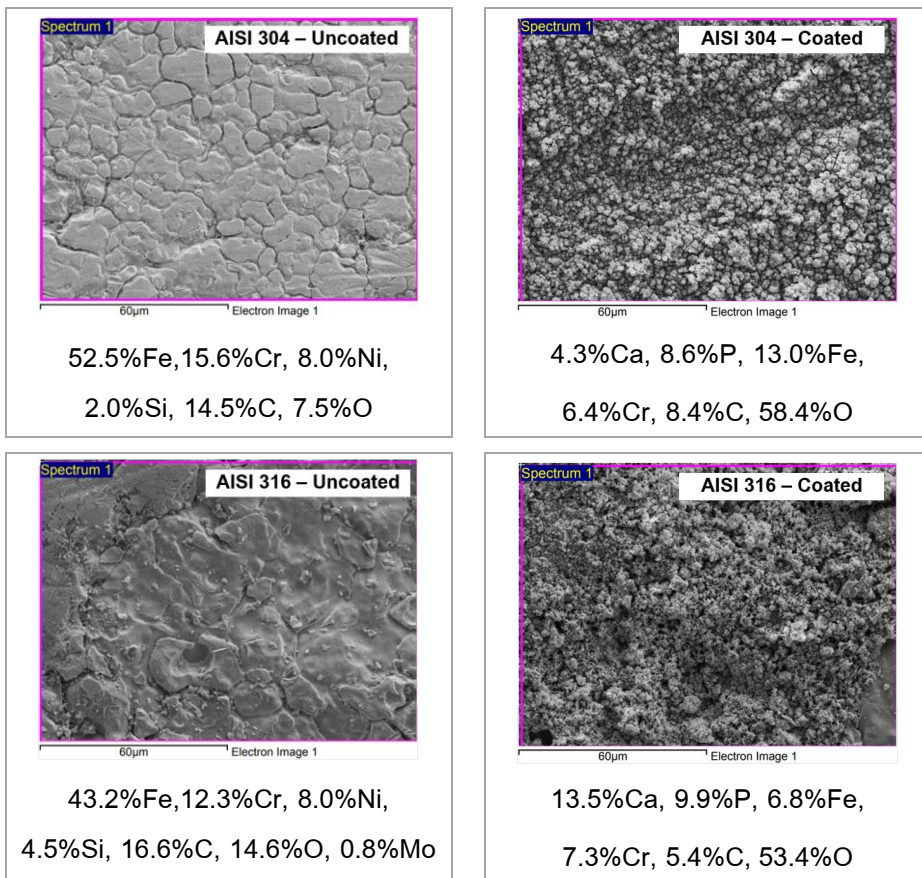
เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบความว่องไวทางชีวภาพโดยแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7 วัน ผลที่เกิดขึ้นพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ AISI 316 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะเห็นโครงสร้างเกรนที่เกิดขึ้นที่ผิวอย่างชัดเจน ส่วนชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิว จะพบผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 จะเกิดขึ้นสมบูรณ์กว่า AISI 304 ตามรูปแบบลักษณะของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3-4 และเมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่ผิวของชิ้นงานด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบและเผาผนึกจะพบองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) เหล็ก (Fe) และอื่น ๆ เป็นต้น โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 จะพบธาตุโมลิบดีนัม (Mo) เข้ามาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ส่วนชิ้นงานที่เคลือบผิวและเผาผนึก เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จะพบสารธาตุแคลเซียม (Ca) 4.3% และฟอสฟอรัส (P) 8.6% ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ที่เคลือบผิวและเผาผนึกจะพบสารธาตุแคลเซียม (Ca) 13.5% และฟอสฟอรัส (P) 9.9% ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 หลังการแช่ในสาร SBF



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 หลังการแช่ในสาร SBF



รูปที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS หลังแช่ในสารละลาย SBF

### 3.4 อภิปรายผล

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ก่อนที่จะทำการเคลือบผิวโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์และทำการเผาผนึก จะสังเกตได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีความขรุขระ ( $Ra_{เฉลี่ย} = 208.58 \text{ nm}$ ) สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ( $Ra_{เฉลี่ย} = 156.87 \text{ nm}$ ) แม้ว่าทำการเตรียมผิวเช่นเดียวกันก็ตาม (หัวข้อ 2.1) ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีส่วนผสมของธาตุโมลิบดีนัมเพิ่มเข้ามาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยธาตุโมลิบดีนัมสามารถเกิดการตกตะกอน (Precipitation) เป็นคาร์ไบด์ชนิด  $(Fe, Cr, Mo)_{23}C_6$  เช่นเดียวกับกับธาตุโครเมียม [18] ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 จึงมีปริมาณคาร์ไบด์มากกว่า ซึ่งคาร์ไบด์จะมีความแข็งสูง ส่วนเฟสออสเทนนิติก (Austenitic phase) ซึ่งเป็นเฟสเนื้อพื้นจะมีความแข็งที่ต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้จึงเป็นไปได้ว่าหลังทำการเตรียมผิวแล้ว ความขรุขระของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ซึ่งมีปริมาณคาร์ไบด์มากกว่า จึงมีค่าความขรุขระสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และได้ส่งผลต่อค่าความขรุขระหลังทำการเคลือบผิวและการเผาผนึก

จากการทดสอบความขรุขระผิว การทดสอบวัดมุมสัมผัสน้ำ และผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ที่ผ่านการเคลือบผิวโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์และทำการเผาผนึก ทำให้พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างส่งผลต่อการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ โดยหากพื้นผิวมีความขรุขระมาก ก็จะส่งผลให้มีแนวโน้มที่แสดงพฤติกรรมไฮโดรโฟบิกมากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [14, 15] และบทความทางวิชาการต่าง ๆ [19] โดยสามารถอธิบายได้ว่า ความขรุขระที่เกิดขึ้นหลังการเคลือบผิวเกิดจากอนุภาคที่อยู่ในสารเคลือบและเมื่อนำมีการสัมผัสกับผิวที่มีความขรุขระก็จะเกิดการสะสมของอากาศตามร่องหรือหลุมจากความขรุขระนั้น เมื่อทำการทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำจึงส่งผลให้ปริมาณพื้นผิวที่น้ำสัมผัสกับพื้นผิวที่เคลือบมีค่าลดลง หรือมีค่ามุมสัมผัสพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้น [16, 17]

ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า ชิ้นงานเมื่อผ่านการเคลือบผิวและเผาผนึกจะทำให้มีความขรุขระและมุมสัมผัสที่ผิวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสสูงกว่าและมีสมบัติไฮโดรโฟบิกมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [20] ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเปียก (Wettability) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 และพบว่ามุมสัมผัสของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่าที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ทั้งนี้ งานวิจัยก็ยังไม่สามารถอภิปรายได้ชัดเจนว่าเกิดจากสาเหตุใด

จากเมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิด ไปทดสอบความว่องไวทางชีวภาพด้วยการนำไปแช่ในสาร SBF เป็นเวลา 7 วัน พบว่า แม้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 จะมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า (มุมสัมผัสของหยดน้ำสูงกว่า) เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งน่าจะเป็นอุปสรรคในการช่วยให้

แคลเซียมฟอสเฟตก่อตัวบนพื้นผิว แต่การที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีผิวที่ขรุขระมากกว่าทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า จึงส่งผลให้ผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพดีกว่านั่นเอง

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ AISI 316 ที่ผ่านการเคลือบผิวโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ สรุปผลได้ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ด้วยเทคนิค AFM แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเคลือบผิวและเผาผนึก ชิ้นงานจะมีค่าความขรุขระสูงขึ้น โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 จะมีค่าความขรุขระสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

4.2 ผลการวัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 พบว่าชิ้นงานจะมีมุมสัมผัสสูงขึ้นหลังจากทำการเคลือบผิวด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และเผาผนึก โดยจะแสดงพฤติกรรมแบบไฮโดรโฟบิก โดยมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำ  $106.12^\circ$  และ  $116.41^\circ$  ตามลำดับ

4.3 ผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพหลังจากแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7 วัน พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ AISI 316 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และเผาผนึก มีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เป็นรูปแบบของแคลเซียมฟอสเฟตขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีความว่องไวทางชีวภาพและมีแนวโน้มที่จะก่อตัวเป็นกระดูกได้ โดยพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 จะเกิดขึ้นได้ดีกว่า AISI 304

อย่างไรก็ตาม ในมุมมองของผู้วิจัยมีข้อคิดเห็นว่า งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยให้เข้มข้นและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นได้ในกาลต่อไปดังนี้คือ 1) ศึกษากลไกขององค์ประกอบของธาตุ เช่น โมลิบดีนัม ว่าส่งผลต่อการเคลือบและการเผาผนึก ค่าความขรุขระ และมุมสัมผัสของผิวชิ้นงานอย่างไร และ 2) ศึกษาความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) ของผิวเคลือบ และความแข็งแรงของชั้นเคลือบ

#### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ความว่องไวทางชีวภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ที่ถูกเคลือบด้วยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียม ตามสัญญาเลขที่ FF66-P1-119 ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายจิรวุฒิ วรรณภีระ และนางสาวเนตรนภิส สิทธิปัฐ ผู้เก็บข้อมูลในการทดลองงานวิจัยในครั้งนี้ที่ช่วยดำเนินการและรวบรวมผลในการวิจัยครั้งนี้

## References

- [1] Leenakul W, Sutjarittangtham K. Studying of bioactive glass-ceramic containing ferromagnetic nanocrystals from silica and non-silica system by incorporation technique. Bangkok, Thailand: Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon; 2016. (In Thai)
- [2] Vepulanont K. Study and development on surface quality of passivated stainless steel AISI 316L for medical application and testing by electrochemical techniques [Thesis]. Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 1998. (In Thai)
- [3] Seyed MN, Mojtaba A, Ali P, Fathollah M, Masood M. Bioactivation of 304 stainless steel surface through 45S5 bioglass coating for biomedical applications. International Journal of Electrochemical Science 2012;7:2890-903.
- [4] Srakaew NL, Kaewpimai T, Yangklang W, Charerntanom W, Thongsri O, Thaitalay P and Rattanachan ST. Characterization of biomaterial fabricated from polylactic acid /hydroxyapatite composites. In: Ubon Ratchathani University Research Conference, 2018 Jul 12-13; Ubon Ratchathani University. (In Thai)
- [5] Chow LC, Sun L, Hockey B. Properties of nanostructured hydroxyapatite prepared by a spray drying technique. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 2004;109:543-51.
- [6] Bastan FE, Erdogan G, Moskalewicz T, Ustel F. Spray drying of hydroxyapatite powder: The effect of spray drying parameters and heat treatment on the particle size and morphology. Journal of Alloys and Compounds 2017;724:586-96.
- [7] The Medicine Journal [Internet]. Hydroxyapatite [cited 20 Aug 22]; Available from: <https://bit.ly/2VRv5r2> (In Thai)
- [8] Yilmaz B, Pazarceviren AE, Tezcaner A., Evis Z. Historical development of simulated body fluids used in biomedical applications: A review. Microchemical Journal 2020;155: 104713.
- [9] Janphuang N. In vitro behaviour of Beta-calcium pyrophosphate glass-ceramics [Thesis]. Nakhon Ratchasima, Thailand: Suranaree University of Technology; 2007. (In Thai)



- [10] Kravanja KA, Finšgar M. A review of techniques for the application of bioactive coatings on metal-based implants to achieve controlled release of active ingredients. *Materials and Design* 2022;217:110653.
- [11] Singh G, Sharma S, Mittal M, Singh G, Singh J, Changhe L, et al. Impact of post-heat-treatment on the surface roughness, residual stresses, and micromorphology characteristics of plasmasprayed pure hydroxyapatite and 7%-Aloxite reinforced hydroxyapatite coatings deposited on titanium alloy-based biomedical implants. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;18:1358-80.
- [12] Bohner M. Calcium orthophosphates in medicine: from ceramics to calcium phosphate cements. *Injury* 2000;31(Suppl 4):D37-47.
- [13] Masae M, Sikong L, Kongsong P, Pholthawon C, Pawanwatcharakorn N, Abdullah MMAB, et al. Super hydrophilicity and photocatalytic activity of potassium doped TiO<sub>2</sub> nanoparticulate films. *Revista de Chimie* 2016;67(9):1884-90.
- [14] Faibut N, Amornkitbamrung V. Effect of surface roughness on wettability of diamond-like carbon thin films. In: Graduate Research Conference; 2013 Feb 22; Khon Kaen, Thailand. (In Thai)
- [15] Pipattanachat S, Thanyasrisung P, Srimaneepong V. Surface wettability of graphene oxide/silver nanocomposite (GO/AgNP) coated nickel-titanium (NiTi) alloys by electrophoretic deposition. In: RSU National Research Conference 2021 on Science and Technology, 2021 Apr 30; Pathum Thani, Thailand. (In Thai)
- [16] Cassie ABD, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* 1944;40(0):546-51.
- [17] Elliott PR, Stagon SP, Huang H, Furrer DU, Burlatsky SF, Filburn TP. Combined hydrophobicity and mechanical durability through surface nanoengineering. *Scientific Report* 2015;5(1):9260.
- [18] Ostovan F, Shafiei E, Toozandehjani M, Mohamed IF, Soltani M. On the role of molybdenum on the microstructural, mechanical and corrosion properties of the GTAW AISI 316 stainless steel welds. *Journal of Materials Research and Technology* 2021;13:2115-25.

- [19] Thais TP, Lucas FBN, Camila B.T, Marcos AEC, Rafael D, Ana PR. The role played by modified bioinspired surfaces in interfacial properties of biomaterials. *Biophysical Reviews* 2017;9:683-98.
- [20] Estrada-Martínez J, Reyes-Gasga J, García-García R, Vargas-Becerril N, Zapata-Torres MG, Gallardo-Rivas NV, et al. Wettability modification of the AISI 304 and 316 stainless steel and glass surfaces by titanium oxide and titanium nitride coating. *Surface and Coatings Technology* 2017;330:61-70.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



**ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณา หอมจะบก** สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 744 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 044-233-073 ต่อ 3352 โทรศัพท์มือถือ 087-7769920 E-Mail: whomjabok@hotmail.com  
คุณวุฒิ: วศ.ม. วิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2552, วศ.บ. วิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2548  
งานที่สนใจ: การวิเคราะห์และทดสอบ สมบัติทางเคมี/กายภาพ/เชิงกลของวัสดุ การกัดกร่อนของโลหะ การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน



**ดร. นวลละออง สระแก้ว** สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 744 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 044-233-073 ต่อ 3352 โทรศัพท์มือถือ 062-4791579 E-Mail: n\_srakaew@hotmail.com  
คุณวุฒิ: วศ.ด. วิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2558, วท.บ. ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2552  
งานที่สนใจ: วัสดุชีวภาพทางการแพทย์ วัสดุผสม วัสดุนาโน

---

### Article History:

Received: August 28, 2023

Revised: December 18, 2023

Accepted: December 20, 2023