



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเซรามิกชีวภาพจากเถ้าไม้ยางพาราเคลือบบนโลหะด้วย
กระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน

**Development of bio-ceramic from rubber wood ash coatings
on alloy prepared by plasma electrolytic oxidation technique**

วิทยา สิริคุณ

Witthaya Sririkun

มาหามะสุไฮมี มะแซ

Mahamasuhaimi Masae

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2559

บทคัดย่อ

แคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกได้แก่ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการทดแทนกระดูกเนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับกระดูกมาก ถ้าไม่อย่างพาราเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRD, SEM และ FTIR สำหรับการวิเคราะห์ด้วย XRD จะใช้มาตรฐานของ JCPDS file No.001-1160 ในการเปรียบเทียบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดและด่างของสารละลายเสมือนในร่างกายคนจะใช้เครื่องวัดค่า pH การสลายตัวของแคลเซียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES หลังจากนั้นนำผงที่สังเคราะห์ได้ไปทำการเคลือบบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชันที่สภาวะสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะคงที่กำลังไฟฟ้ากระแสตรง อิทธิพลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ได้ศึกษาในครั้งนี้ด้วย พบว่าชั้นฟิล์มที่เคลือบมีความหนาและความขรุขระมีค่ามากที่สุดที่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ดังนี้ $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{KOH} > \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH} > \text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + \text{KOH}$

คำสำคัญ : พลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน, แคลเซียมฟอสเฟต, ถ้าไม่อย่างพารา



ABSTRACT

Calcium phosphate ceramic such as hydroxyapatite (HA) is good candidate for bone substitutes due to their chemical and structural similarity to bone minerals. Rubber wood ash (RWA) which predominantly composed of calcium carbonate was used as a starting material for synthesizing hydroxyapatite powder by calcination the RWA powder at 800 °C for 1 h. The synthesized calcium phosphate characterized by X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscope (SEM), Fourier transformed infrared spectroscopy (FT-IR), was obtained. The XRD pattern also agreed with the standard JCPDS file No.001-1160. The in vitro test was performed in a stimulated body fluid (SBF) medium. The changes of the pH of SBF medium were measured at pre-determined time intervals using a pH meter. The dissolution of calcium ions in SBF medium was determined by an inductively couple plasma spectrometer (ICP-OES). The synthesized calcium phosphate coatings were produced on stainless steel by plasma electrolytic oxidation (PEO) in different electrolytes. This process was conducted under constant pulsed DC voltage condition. The effect of electrolyte solution was also studied. The surface morphology coatings were investigated using atomic force microscope (AFM). It was found that the coated sample film thickness and roughness increased in electrolyte the following order: $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{KOH} > \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH} > \text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + \text{KOH}$

Keywords : Plasma Electrolytic Oxidation, Calcium Phosphate, Rubber Wood Ash

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 กระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน	15
2.3 สารเคลือบฟอสเฟต	17
2.4 สารไฮดรอกซีอะปาไทต์	18
2.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	18
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.7 การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรง อะตอม	21
2.8 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลาย	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	24
3.1 แผนการดำเนินงาน	24
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	27
3.4 เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์	28
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	18
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	30
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของธาตุด้วยเครื่อง X-ray Diffraction	30
4.2 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตที่ผลิตจากเถาไม้ยางพาราด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	34
4.3 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตที่ผลิตจากเถาไม้ยางพาราด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	35
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวชั้นฟิล์มด้วยAFM	36
4.5 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถาไม้ยางพาราได้กับการเข้ากันได้ในสารละลายเสมือนร่างกายมนุษย์ (SBF)	46
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก ก	55
ลักษณะความขรุขระของชั้นฟิล์มที่กำลงขยาย 1×1 เท่า	55
ภาคผนวก ข	59
ลักษณะความขรุขระของชั้นฟิล์มที่กำลงขยาย 5×5 เท่า	59
ประวัติผู้เขียน	63

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
3.1	แผนการดำเนินงานของ โครงการ	24
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์	31
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตจากถั่วไม่ย่างพารา	32
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม่ย่างพารา	33
4.4	แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ AFM ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH	40
4.5	แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ AFM ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH	42
4.6	แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ AFM ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH	44



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	15
2.2	16
2.3	16
2.4	18
2.5	19
2.6	20
2.7	21
2.8	23
3.1	25
3.2	26
3.3	27
3.4	28
3.5	29
4.1	31
4.2	32
4.3	33
4.4	34
4.5	35
4.6	36
4.7	39

NaPO₄·12H₂O กับ KOH

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลาย อิลีกโตรไลต์ $\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH	40
4.9 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิลีกโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH	41
4.10 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลาย อิลีกโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH	42
4.11 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิลีกโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH	43
4.12 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลาย อิลีกโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH	44
4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความขรุขระของชั้นผิวฟิล์ม	45
4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นผิวฟิล์ม	45
4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าแคลเซียมในสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกัน ของ แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากถั่วไม่ยงพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียม ฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	46
4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าแคลเซียมในสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกัน ของ แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากถั่วไม่ยงพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียม ฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	47
4.17 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของ แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากถั่วไม่ยงพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียม ฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	47

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Na_2SiO_3	โซเดียมซิลิเกต
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
KH_2PO_4	โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
CaPO_4	แคลเซียมฟอสเฟต
nm	นาโนเมตร
PEO	Plasma Electrolytic Oxidation
XRD	X-ray diffraction
SEM	Scanning Electron Microscope
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
AFM	Atomic Force Microscope
ICP	Inductively Coupled Plasma
SBF	Stimulated Body fluid
Ca	Calcium
P	Phosphorus
ppm	Part per million



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

วัสดุชีวภาพ (Biomaterial) เป็นวัสดุที่สามารถเป็นส่วนประกอบหรือฝังอยู่ภายในร่างกายของมนุษย์ได้ เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับทดแทนส่วนต่าง ๆ ในร่างกายที่เสียหายจากโรคหรือจากสาเหตุอื่น ๆ โดยที่วัสดุดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดสารพิษและสามารถอยู่ร่วมกับเนื้อเยื่อในร่างกายได้ [1]

การแพทย์ในปัจจุบันได้มีการใช้วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) อย่างกว้างขวางทั้งในการทดแทนอวัยวะที่สูญเสียและใช้ในงานจำพวกศัลยกรรมความงามต่าง ๆ วัสดุกลุ่มเซรามิกเป็นกลุ่มหนึ่งที่นิยมนำมาทำเป็นวัสดุทางชีวภาพเพื่อทดแทนกระดูกสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ไม่สามารถดูดซึมได้ (Nonabsorbable or Relatively Bioinert Bioceramics) กลุ่มที่สามารถดูดซึมได้ (Resorbable or Biodegradable Ceramics) และกลุ่มแก้วเซรามิกชีวภาพ (Bioactive Glass Ceramic) เนื่องจากเซรามิกในกลุ่มที่ไม่สามารถดูดซึมได้จะสังเคราะห์ได้จากสารจำพวกอะลูมินา เซอร์โคเนีย และคาร์บอนเป็นหลัก และกลุ่มแก้วเซรามิกชีวภาพนั้นจะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารซิลิกา ซึ่งเป็นสารที่ไม่ได้เป็นส่วนประกอบหลักในกระดูกและมีความเป็นพิษต่อร่างกาย แตกต่างจากกลุ่มเซรามิกที่สามารถดูดซึมได้ ซึ่งเป็นกลุ่มที่สังเคราะห์มาจากธาตุพื้นฐานที่มีในกระดูกมีความสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี (Biocompatibility) ทำให้ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายและสามารถพัฒนาเป็นกระดูกจริงในร่างกายได้ เซรามิกชีวภาพที่สามารถดูดซึมได้นี้สามารถจำแนกออกได้เป็น เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต เซรามิกอะลูมินาแคลเซียมฟอสเฟต เซรามิกซิงค์แคลเซียมฟอสเฟต เซรามิกซิงค์ซัลเฟตแคลเซียมฟอสเฟต และเซรามิกเฟอริกแคลเซียมฟอสเฟตออกไซด์ แต่กลุ่มที่โดดเด่นคือ กลุ่มเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตเนื่องจากมีโครงสร้างใกล้เคียงกับโครงสร้างพื้นฐานของกระดูกของสิ่งมีชีวิต [2]

เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate Ceramic) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำกระดูกเทียมที่นิยมมากโดยเฉพาะ 2 กลุ่มหลักคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และไตรแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งวัสดุพวกนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเนื้อมานำให้เนื้อเยื่อกระดูกโดยรอบตำแหน่งที่ได้รับให้มีการเจริญเติบโตเข้าไปในกระดูกเทียมนั้น โดยมีแคลเซียมจะถูกนำไปเติมในช่องว่างกระดูก (Bone Defect) ที่เอารอยโรคออกไปแล้วโดยหวังผลให้มีการเจริญเติบโตของกระดูกใหม่ซึ่งกระดูกเทียมจะมีโครงร่างให้กระดูกใหม่จะเข้าไปเจริญเข้าไปภายในส่วนที่เป็นรูพรุน แคลเซียมฟอสเฟต

เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของกระดูกและฟันยังมีปริมาณมากที่สุดในร่างกายหรือประมาณ 1,200 - 2,000 กรัม ซึ่งร้อยละ 99 ในจำนวนนี้เป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟันอีกประมาณ ร้อยละ 1 หรือ 12 กรัม พบในเลือดเนื้อเยื่อและของเหลวต่าง ๆ ของร่างกาย [3] แคลเซียมฟอสเฟตสามารถหาได้จากการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์และการสังเคราะห์จากวัสดุชีวภาพ

ประเทศไทยในปัจจุบันเป็นประเทศเกษตรกรรมภาคใต้เป็นภูมิภาคที่ปลูกยางพารามากที่สุดของประเทศและได้มีการศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเถาไม้ยางพาราขึ้นเพื่อลดต้นทุนการนำเข้าของแคลเซียมฟอสเฟตจากต่างประเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าของไม้ยางพารา จากศึกษาสามารถนำเถาไม้ยางพารานำมาผลิตเป็นแคลเซียมฟอสเฟตไบโอเซรามิกได้เนื่องจากองค์ประกอบหลักในเถาไม้ยางพารามีปริมาณของแคลเซียมสูง ซึ่งอัตราส่วนเถาไม้ยางพารา (RWA) ต่อฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ที่เหมาะสมคือ 10 : 3 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งได้แคลเซียมฟอสเฟตชนิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ อยู่ 34 % และแคลเซียมไพโรฟอสเฟตอยู่ 33% เป็นแคลเซียมฟอสเฟตที่มีอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสคือ 1.67 และ 1.0 ตามลำดับ [4]

จากแนวคิดข้างต้นนี้จึงทำให้เกิดโครงการนี้ขึ้นเพื่อศึกษาการเคลือบโลหะด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากเถาไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชันเพื่อนำโลหะที่ได้มาทดแทนกระดูกและฟันและส่วนข้อต่อต่างๆ ในร่างกายมนุษย์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ผลิตเซรามิกชีวภาพที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตโดยใช้เถาไม้ยางพาราเป็นส่วนผสม

1.2.2 เคลือบโลหะด้วยไบโอเซรามิกที่ได้จากเถาไม้ยางพาราโดยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน

1.2.3 เพื่อได้แผ่นโลหะเคลือบเซรามิกชีวภาพเพื่อทดแทนอวัยวะในร่างกายมนุษย์

1.3 ขอบเขต

1.3.1 เคลือบแคลเซียมฟอสเฟตจากเถาไม้ยางพาราบนโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน

1.3.2 ศึกษาลักษณะฟิล์มเคลือบที่เกาะติดบนโลหะ ได้แก่ ความหนา ลักษณะพื้นผิว ความขรุขระของพื้นผิว

1.3.3 ศึกษาการสลายตัวของแคลเซียมและฟอสเฟตของผิวเคลือบในสารละลายที่เสมือนที่
อยู่ในร่างกายมนุษย์ (Stimulated Body Fluid, SBF) เป็นเวลา 1 ถึง 14 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 เคลือบโลหะด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากถั่วไม่ย่างพาราโดยกระบวนการ
พลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน

1.4.2 ได้แผ่นโลหะเคลือบแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อทดแทนกระดูกและฟันในร่างกายมนุษย์



บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำแคลเซียมฟอสเฟตจากเถ้าไม้ยางพารามาเคลือบบนโลหะเพื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน ดังนั้นในรายละเอียดที่ศึกษาจะกล่าวถึงหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิศา จันทร์พวง [5] ได้ศึกษาไบโอเซรามิกหรือเซรามิกชีวภาพไบโอเซรามิกหรือเซรามิกชีวภาพมีคุณลักษณะพิเศษคือสามารถเกิดพันธะกับเนื้อเยื่ออ่อนได้ดีทัดเทียมกับการเกิดพันธะกับกระดูกในด้านของการใช้งานถ้าวัสดุสามารถเกิดพันธะกับเนื้อเยื่ออ่อนหรือกระดูกจะเกิดการยึดเกาะกันแน่นช่วยให้มีความเสถียรคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุที่เป็นไบโอแอคทีฟขึ้นกับชนิดของวัสดุ ภูมิภาค ขนาด และเวลาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิววัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อฝังภายในร่างกายที่พื้นผิวจะเกิดชั้นของแอคทีฟคาร์บอนที่มีไฮดรอกซีอะพาไทต์ ก่อให้เกิดพันธะที่เชื่อมต่อกับเนื้อเยื่อการเกิดพันธะกับกระดูกที่พบครั้งแรกในไบโอเซรามิก ซึ่งมีส่วนประกอบของ SiO_2 , Na_2O , CaO และ P_2O_5 ที่มีสัดส่วนเฉพาะการที่มีปริมาณ Na_2O และ CaO สูง จึงทำให้พื้นผิวเกิดปฏิกิริยากับสารละลายได้ง่ายขึ้น สำหรับพันธะที่เกิดขึ้นนั้นเกิดโดยปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก้วกับของเหลวในร่างกาย มีผลทำให้เกิดชั้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งกระดูกสามารถสร้างพันธะด้วยได้

ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์ และ สุลาวัลย์ ขาวม่วง [6] ได้ศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสังเคราะห์จากสารละลายของไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) ด้วยการจุ่มแผ่นกระจกลงในสารละลายดังกล่าว หลังจากนั้นใช้เทคนิคโคล์พลาสมาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและอุณหภูมิห้องโดยการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าและความถี่สูงจนก๊าซแตกตัวเป็นไอออนและตกเคลือบลงบนฟิล์มบนแผ่นกระจกหลังจากนั้นให้อุณหภูมิกับกระจกตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ถึง 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีโดยอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC) หรือพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF) หรือไมโครเวฟ

ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ [7] ได้ศึกษาของการเกิดออกซิเดชันของผิวเคลือบจนวนความร้อน (TBC) โดยใช้ Thermal Gravimetric Analysis และ Scanning Electron Microscope เป็นเครื่องมือหลักในการศึกษาการเกิดออกซิเดชันและความเสียหายเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันต่อโครงสร้างของผิวเคลือบในงานวิจัยนี้โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่ผ่านการทดสอบในเตาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดออกไซด์และการโต

ของรอยแตกรวมทั้งการบ่งชี้ถึงจุดกำเนิดของรอยแตก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการศึกษากลไกการเสียหายแบบ Spallation ของผิวเคลือบ TBC สำหรับ TBC ที่นำมาศึกษานี้ประกอบด้วยชั้นงานนิกเกิลรูปเปอร์ออลลอยเป็นผิวรองรับผิวเคลือบ NiCrAlY บนผิวรองรับและผิวเคลือบเซรามิก $ZrO_2 - 8\% Y_2O_3$ บน NiCrAlY ซึ่งผิวเคลือบทั้ง 2 ชั้นนั้นผลิตโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบพลาสมาในบรรยากาศปกติผลการวิจัยปรากฏว่าความเสียหายใน TBC เกิดจากการโตของรอยแตก ณ รอยต่อของผิวเคลือบทั้ง 2 หรือในผิวเคลือบเซรามิกภายในผิวพ่นเคลือบและออกไซด์ของผิว NiCrAlY (TGO) จะเต็มไปด้วยจุดบกพร่องต่าง ๆ เช่น รอยแตกระดับไมครอน และรูพรุนจุดบกพร่องเหล่านี้เองจะทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดของรอยแตกในผิวเซรามิกการโตของรอยแตกดังกล่าวจะเป็นเหตุให้เกิดการหลุดร่อนของเนื้อวัสดุผิวเคลือบขึ้น

พนิกาญจน์ เกตุแก้ว [8] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ชั้นเคลือบแคลเซียมและฟอสฟอรัสบนพื้นผิวไทเทเนียม ด้วยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันในอิเล็กโทรไลต์สำหรับเคลือบเพื่อการรวบรวมตัวกับกระดูก ซึ่งประกอบด้วยไอออนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสและศึกษาผลของเวลาและความเป็นกรดและด่างของอิเล็กโทรไลต์ต่อลักษณะพื้นฐานและสมบัติของชั้นเคลือบโดยลักษณะของพื้นฐานพื้นผิวความขรุขระขององค์ประกอบของธาตุ โครงสร้างทางเคมีพฤติกรรม การกัดกร่อนและการซึบหรือของชั้นเคลือบผิว โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน เครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องมือโพเทนทิโอสแตท/แกลวานอสแตท เครื่องไมโครไดรโบลีย์ พบว่าชั้นเคลือบผิวที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดไมโครเมตรและชั้นเคลือบผิวที่สังเคราะห์ในอิเล็กโทรไลต์สำหรับเคลือบเพื่อการรวมตัวของกระดูกมีองค์ประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัส ผลการทดลองแสดงว่าลักษณะพื้นฐาน ความขรุขระ ขนาดความพรุนของชั้นเคลือบผิวอยู่กับปัจจัยทั้งสองข้างต้น เมื่อเวลาในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันและความเป็นกรดและด่างของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น การศึกษาสมบัติมีขั้วของชั้นเคลือบผิวด้วยเทคนิคการวัดค่ามุมสัมผัส โดยใช้หยดน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วหยดบนพื้นผิวชั้นเคลือบแคลเซียมและฟอสฟอรัส พบว่าพื้นผิวไทเทเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบและพื้นผิวไทเทเนียมที่ผ่านการเคลือบแคลเซียมและฟอสฟอรัส เป็นพื้นผิวแบบมีขั้วการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนใน Lacted Ringer's Solution โดยวิธีโพเทนทิโอดินามิกส์โพลาเซชัน ผลการทดลองพบว่าพื้นผิวไทเทเนียมที่ผ่านการเคลือบแคลเซียมและฟอสฟอรัสมีสมบัติป้องกันการกัดกร่อน ผลการทดสอบของการสึกหรอด้วยเครื่องไดรโบลีย์ พบว่าพื้นผิวไทเทเนียมที่ผ่านการเคลือบสามารถทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าพื้นผิวไทเทเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ

พัฒนา เทพชโลธร [9] ได้ศึกษาวิธีการและสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบบริแอกทีฟ โดยการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่ใช้ให้มีปริมาณต่าง ๆ ในระหว่างการศึกษาและการเคลือบฟิล์มจากนั้นศึกษาสมบัติและโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ รวมทั้งผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อฟิล์ม โดยวิเคราะห์ผลด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน, Energy Dispersive X - ray Spectroscopy, Atomic Force Spectroscopy และหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางที่สร้างได้ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศที่มีผลต่อกระบวนการต่าง ๆ ของสปัตเตอริงโดยสามารถแบ่งโหมดการเคลือบฟิล์มได้ 2 แบบ คือ โหมดการเคลือบฟิล์มโลหะและโหมดการเคลือบฟิล์มโลหะออกไซด์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนแบบบริแอกทีฟ เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟระหว่าง 0.92 ถึง 1.27 sccm จะได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นผลึกเมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ฟิล์มที่สร้างได้มีโครงสร้างเป็นผลึกแบบเคลต้าเฟตหรือเทต้าเฟตหรือมีทั้งสองเฟตโดยมีระนาบต่าง ๆ เหล่านี้จะตัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ขนานไปกับผิวของวัสดุรองรับค่าความขรุขระของพื้นที่ผิวหน้าของฟิล์มที่สร้างได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.04 nm และฟิล์มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเฉลี่ยเท่ากับ 8.53 เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมไว้มาอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส, 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับเป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าช่วงอุณหภูมิค่าดังกล่าวไม่มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างของฟิล์ม

อภิญา สาริกบุตร, พัฒนะ จันทนาวิวัฒน์ และ ณรงค์ ผังวิวัฒน์ [10] ได้ศึกษาการนำเหล็กคาร์บอนมาใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรมและในชีวิตประจำวัน เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ก่อสร้างเครื่องใช้สำนักงานและบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากเหล็กคาร์บอนนั้นมีความอ่อนตัวสูงเชื่อมและขึ้นรูปได้ง่ายมีสมบัติเชิงกลที่ดีและราคาถูก แต่จะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อน ในงานวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กคาร์บอนโดยการเคลือบด้วยวัสดุผสมของโครเมียมฟอสฟอรัสโดยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีอิเล็กโตรดิโพสิชัน (Electrodeposition) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบเวลาที่ใช้ในการเคลือบอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ความเข้มข้นของโครเมียมซัลเฟตความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์และอัตราส่วนจำนวนโมลของกรดมาลิกต่อกรดบอริกโดยชิ้นงานที่ได้จะทำการคำนวณหาความหนาของผิวเคลือบจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวเคลือบและความหนาแน่นของโครเมียมทำการศึกษาลักษณะของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micro scope, SEM) หาดองค์ประกอบและปริมาณ

ของสารเคลือบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) และทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ โดยใช้สารละลาย NaCl 0.1 โมลาร์ เป็นอิเล็กโทรไลต์จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบด้วยวัสดุผสมโครเมียมฟอสเฟตเพื่อป้องกันการกัดกร่อน คือ การใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในการเคลือบ 5 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ระยะเวลาในการเคลือบ 45 นาที อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 45 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโครเมียมซัลเฟต 0.20 โมลาร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ 0.40 โมลาร์ และอัตราส่วนโมลระหว่างกรดมาลอนิกต่อกรดบอริกเป็น 1 : 2 ซึ่งจะได้ความหนาของผิวเคลือบที่เหมาะสมและให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Ecorr) ที่สูงและอัตราการกัดกร่อนต่ำ

ธวัช นุสนธรา, ชูชาติ นิติปัญญาวงศ์ และ ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์ [11] ได้ศึกษาการเคลือบโลหะผสมสังกะสีแมงกานีสบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟฟ้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนกำลังได้รับความสนใจสำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงซึ่งสูงกว่าสังกะสีและโลหะผสมสังกะสีอื่น ๆ การเข้าเคลือบของอ็อกไซด์โลหะขึ้นกับสภาวะการเคลือบซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของผิวเคลือบ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลือบโลหะผสมสังกะสีแมงกานีสบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิห้องด้วยสารละลาย Sulfate-Citrate - EDTA ความเป็นกรด - ค่า 5.8 ในสภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 1 - 5 A.dm² เพื่อให้ได้ความหนาของผิวเคลือบ 10 ไมครอนโดยทำการกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นอัลตราโซนิคและตรวจสอบสมบัติผิวเคลือบด้วย SEM และ EDX ผลการเคลือบพบว่าโลหะผสมนี้สามารถเคลือบได้ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 1 A.dm² ผิวเคลือบที่เคลือบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 A.dm² มีสัดส่วนของแมงกานีสโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 15 และประสิทธิภาพการเคลือบร้อยละ 40 เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสในผิวเคลือบเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงแต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 3 - 5 A.dm² ปริมาณแมงกานีสในผิวเคลือบค่อนข้างคงที่อยู่ที่ร้อยละ 20 - 22 ประสิทธิภาพการเคลือบอยู่ในช่วงร้อยละ 25 - 35 โลหะผสมสังกะสีแมงกานีสมีโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวเป็นรูปทรงกลม (Nodular) การกวนสารละลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคผิวได้เคลือบที่มีความแน่นและมีคุณภาพดีกว่าการกวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่การกวนสารละลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคทำให้สัดส่วนของแมงกานีสในผิวเคลือบลดลง

วิภาสศรี วิริยะรักษ์ [12] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์บนผิวหน้าของโลหะด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยส่วนมากนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์พอลิแอนิลินบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Potentiostatic) ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาในการสังเคราะห์ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์และชนิดของสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ โดยขั้นตอนแรกทำการศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าฟิล์มของพอลิแอนิลินจะเกิดในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.8 - 1.2 โวลต์/วินาที ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของแอนิลินเพิ่มขึ้น ฟิล์มของพอลิเมอร์จะเกิดได้เร็วขึ้น โดยนำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ตามลำดับพบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและได้หุ้มฟังก์ชันเป็นรูปแบบเดียวกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งงานที่เคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริก กรดออกซาลิก และ โซเดียม โดเดซิลซัลเฟตสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร ได้ดีโดยฟิล์มพอลิเมอร์ ที่ได้จากการเตรียมในสารละลายกรดออกซาลิกที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.95 โวลต์/วินาที ความเข้มข้นแอนิลินมอนอเมอร์ 0.1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 20 นาที สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดจากการทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า พบว่าการเตรียมในสารละลายกรดซัลฟิวริกและกรดออกซาลิกให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสใกล้เคียงกัน คือ 32 และ 28.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยเฉพาะในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมากที่สุดถึง 53.7 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร

ภาณุสฤษฎ์ บุญคำ [13] ได้ศึกษาการพัฒนาชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียม โดยใช้หลักของการยศาสตร์ และประเมินแบบชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า สำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียม โดยใช้หลักของการยศาสตร์ผู้วิจัยออกแบบจำนวน 3 แบบ คือ แบบ ก แบบ ข และแบบ ค การออกแบบกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียม ผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอนการชุบจำนวน 9 ขั้นตอนดังนี้ 1. ขั้นตอนล้างด้วยไฟฟ้า 2. ขั้นตอนล้างน้ำไหลสั้น 3. ขั้นตอนกระตุ้นผิวด้วยกรด 4. ขั้นตอนล้างด้วยน้ำกลั่น 5. ขั้นตอนน้ำยาชุบเงิน 6. ขั้นตอนล้างเก็บกลบน้ำยาชุบเงิน 7. ขั้นตอนน้ำยาชุบโรเดียม 8. ขั้นตอนล้างเก็บกลบน้ำยาชุบโรเดียม 9. ขั้นตอนล้างน้ำไหลสั้นและน้ำร้อน ผลวิจัยมีดังนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียม โดยใช้หลักของการยศาสตร์จำนวน 3 แบบ คือ แบบ ก แบบ ข และแบบ ค โดยได้ออกแบบโครงสร้างของเครื่อง

ชุบให้สอดคล้องตามหลักของกายศาสตร์ของชาวเอเชียมีรูปแบบโครงสร้างเป็นรูปตัวซี (C) ขนาดความกว้าง 1.60 เมตร ความยาว 1.80 เมตร ความสูง 1.40 เมตร ผู้เชี่ยวชาญประเมินแบบของชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า สำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียมโดยใช้หลักของกายศาสตร์แบบ ค มีค่าเฉลี่ยโดยภาพรวมสูงสุดอยู่ในระดับเกณฑ์ดีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.39 (SD = 0.47, t = 1.638, p < 0.05) การประเมินความล้าจากการทำงานโดยใช้แบบประเมินท่าทางของร่างกาย RULA ผลการประเมินอยู่ที่ระดับ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.00 (SD = 0.00) หมายความว่าชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียมโดยใช้หลักของกายศาสตร์ แบบ ค ที่ได้ออกแบบมีระดับความล้าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้แต่ทั้งนี้ อาจมีปัญหาค่าความล้าได้ถ้ามีการทำงานดังกล่าวซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน

Kalita, S. & Verma, S. [14] ได้ศึกษากรรมวิธีในการเคลือบมีความหลากหลาย เช่น การจุ่ม (Dip Coating) การพ่น (Spray Coating) เป็นต้น ซึ่งการเลือกวิธีพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) เคลือบโลหะกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) หรือกระบวนการพ่นผิวทางไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการเกิดฟิล์มออกไซด์บนแผ่นโลหะ โดยส่วนใหญ่แล้วแผ่นโลหะที่ใช้ทำการเคลือบได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม แมกนีเซียม ไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งผลจากการเคลือบด้วยกระบวนการนี้จะได้ชั้นฟิล์มที่มีความหนาอยู่ในช่วง 10 - 100 ไมโครเมตร โดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่เคลือบผิวที่ง่ายและพื้นผิวเคลือบมีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่เพิ่มพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบ โดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการเคลือบเซรามิกบนแผ่นโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของโลหะและผิวชั้นเคลือบ

Salih, F., Isil, K. & Metin, U. [15] ได้ศึกษากระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน ได้มีการศึกษากระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) โดยได้นำแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนไปขัดแล้วนำไปล้างน้ำสะอาดซึ่งแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนนั้นเป็นตัวแอโนดแล้วได้ทำการเตรียมอิเล็กโตรไลต์ 2 ชนิด คืออิเล็กโตรไลต์อะลูมิเนียมที่ประกอบด้วยโซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับอิเล็กโตรไลต์ชนิดซิติลิกเกิดประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิติลิก (Na_2SiO_3) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วได้แปรผันกำลังศักย์ไฟฟ้าโดยให้ความถี่เท่ากับ 2000 เฮิรซ์ ทำการแปรผันปริมาณของผงไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 2, 4, 8 และ 16 กรัม/ลิตร ของทั้งสองชนิดอิเล็กโตรไลต์ ผลจากการศึกษาได้สรุปว่าการเคลือบผิวเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ซิติลิกจะเกิดเฟสของอะนาเทสและ

เฟสของรูทล์ สำหรับปริมาณปริมาณของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 8 กรัม/ลิตร จะเป็นปริมาณที่ดีที่สุดในการดักการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน ยังมีการศึกษาการเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์บนโลหะไทเทเนียม (Ti_6Al_4) ด้วยกระบวนการ PEO ซึ่งได้ใช้แผ่นโลหะไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดและใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทดแล้วได้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารละลายที่เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์คือแคลเซียมอะซีเตตเบตาแคลเซียมกลีเซอโรฟอสเฟตและน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเคลือบด้วยกระบวนการ PEO ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับกำลังไฟฟ้า 100 กิโลวัตต์

Guang-xin, T., Ren-ji, Z., Yong-nian, Y. & Zhang-xiao Z. [16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบผิวให้ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์พรุณด้วยกระบวนการ PEO โดยใช้แผ่นโลหะไทเทเนียมเป็นตัวแอโนดและใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแคโทด ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือเบตาไกลีเซอโรฟอสเฟตไดโซเดียมเพนตะไฮเดรต 0.02 โมล แคลเซียมอะซีเตต 0.2 โมล และน้ำ 1000 มิลลิลิตร โดยใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 200 โวลต์ ใช้เวลา 2 นาที ผลจากการทดลองสรุปว่าได้เกิดเฟสอะนาทาสและมีธาตุ แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) ไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสคือ 1.52 และได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของชั้นฟิล์มมีค่า 36.3 นิวตัน

Shokouhfar, M., Dehghanian, C., & Baradaran, A. [17] ได้ศึกษาการใช้กระบวนการพลาสมาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (PEO) เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์ฟิล์มออกไซด์เซรามิก เช่นเดียวกับโลหะวาล์ว เช่น อลูมิเนียม ไทเทเนียม แมกนีเซียม และเซอร์โคเนียมที่แรงดันไฟฟ้าที่สูง โดยเคลือบออกไซด์ที่ความโดดเด่นด้วยประสิทธิภาพเป็นมิตรต่อระบบนิเวศที่ทนต่อการกัดกร่อนและมีความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานการสึกหรอและมีความแข็งแรงพันธะที่ดีกับพื้นผิว แต่วัตถุประสงค์หลักของการให้บริการเคลือบ PEO ใน Ti และโลหะผสมที่เพิ่มขึ้นและความต้านทานการกัดกร่อนความต้านทานการสึกหรอกระบวนการพลาสมาออกซิเดชัน (PEO) เกี่ยวข้องกับไอออนไดซ์ที่มีศักยภาพจุดประกายแรงดันของสารเคลือบผิวในระหว่างการเคลือบ มีการเจริญเติบโตระยะเวลาสั้น ๆ ที่มีอยู่บ่อยไมโครมีการผลิตอย่างต่อเนื่องเหนือพื้นผิวเคลือบพร้อมกับวิวัฒนาการของก๊าซ

Riyad, O. & Hussein O. [18] ได้ศึกษาการเคลือบและป้องกันการกัดกร่อนในโลหะผสมแสงโดยพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน โดยสามารถเคลือบสารเคลือบหนามากบนพื้นที่ผิววัสดุเพื่อความแข็งแรง ความต้านทานความร้อน ความเป็นฉนวนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและทนต่อการกัดกร่อนในช่วงเวลาสั้น ๆ

Shokouhfar, M., Dehghanian, C. & Montazeri, M. [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการพลาสมาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (PEO) ของโลหะเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนรวมกับกระบวนการบางส่วนพร้อมกับการสร้างฟิล์มออกไซด์การสลายตัวของอิเล็กทริก โดยมีการใช้อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส และมีความดัน 102 MPa ส่วนโลหะที่มีความแข็งกระแสไฟฟ้าจะดูดซับลงบนผิวโลหะโดยการเคลือบบนเซรามิกแก้วโดยใช้เวลา 5 วินาที และ 180 วินาที และแรงดันของกระแสไฟฟ้ามีแรงดันถึง 1,000 โวลต์

Kumar, M., Kwon, H. & Jung, H. [20] ได้ศึกษากระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (PEO) โดยเป็นการเคลือบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของแมกนีเซียม (Mg) และโลหะผสมเพื่อการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพด้านการเคลือบผิวของพื้นผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวและการป้องกันการกัดกร่อน และมีการทดสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์จำนวนของรูพรุนในกระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการ PEO โดยใช้การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าพื้นผิวเคลือบมีเป็นส่วนใหญ่ประกอบด้วย Mg_2SiO_4 , $Mg_3(PO_4)_2$ ที่มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการ PEO

Dzhurinskiy, D., Gao, Y. & Yeung, K. [21] ได้ศึกษาการเคลือบ TiO_2 บนพื้นผิวโลหะผสมโดยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (PEO) โดยใช้ TiO_2 เคลือบให้อยู่ในสารละลายของโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พื้นผิวของสารเคลือบที่เกิดขึ้นได้รับการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในขณะที่องค์ประกอบของสารเคลือบที่ได้วิเคราะห์โดยการกระจายพลังงานการวิเคราะห์ X-ray (EDS) และศึกษาโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้ารวมทั้งมีศักยภาพของขั้วสเปกโทรสโกปีและความต้านทานไฟฟ้าและเมื่อเทียบกับพฤติกรรมกัดกร่อนของไทเทเนียมเปรีออส ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบการเคลือบ PEO แสดงให้เห็นโครงสร้างของพื้นผิวที่มีรูพรุนที่มีอนุภาคนาโนฝังกระจายทั่วทั้งพื้นผิวของ TiO_2

Zhong, Z., Gang, Z. & Hong, L. [22] ได้ศึกษาผลของ pH อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์และเวลาในการเคลือบแคลเซียมฟอสเฟตบนพื้นผิวไทเทเนียม โดยใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมฟอสเฟตมีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 2.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าเท่ากับ 2.3, 3.5, 4.5 และ 6.0 อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 45 ถึง 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าเท่ากับ 1.67, 5.00, 10.00, 20.00 และ 60.00 นาที จากงานวิจัยนี้เมื่อเพิ่มค่า pH เวลา และอุณหภูมิในกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าพบว่าเฟสแคลเซียมฟอสเฟตไทเทเนียมในชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นและมีการตกตะกอนไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มมากขึ้นด้วย

Xiwen, Y., Chen, L. & Zongcheng, Y. [23] ได้ศึกษาแหล่งกำเนิดการเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการพลาสมาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (PEO) กระบวนการนี้สำหรับการเคลือบจะถูกนำมาไปใช้เจริญเติบโตของฟิล์มออกไซด์และได้ศึกษาเคลือบ PEO ที่มีออกไซด์คอมโพสิต $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งบนพื้นผิวอลูมิเนียมที่มีไมโครบนพื้นผิวและผลของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปใช้ในทางจุลภาคและองค์ประกอบของสารเคลือบได้ถูกตรวจสอบ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของชั้นผิวได้รับอิทธิพลอย่างมากจากพารามิเตอร์กระบวนการแรงดันไฟฟ้าที่สูงนำมาใช้ก่อให้เกิดปริมาณของ Ti ในชั้นลดลงความพรุนของผิวเคลือบ นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบของการเคลือบที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกไมโครบ่งชี้อย่างชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในโครงสร้างจุลภาคของ Ti

Balamurugan, A., Balossier, G. & Kannan, S. [24] ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีและลักษณะของโครงสร้างของสแตนเลสสตีลที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เสริมแรงด้วยเซอร์โคเนียด้วยวิธีการโซลเจล โดยการใช้วัสดุผสม Yttri - Stabilized Zirconia (Ysz)/1 Hydroxyapatite (HA) เคลือบบนโลหะสแตนเลสสตีลที่ใช้ในการผ่าตัดชนิด 316L ในการจุ่มเคลือบก่อนจะนำไปเคลือบในช่องอุณหภูมิต่าง ๆ ในการศึกษานี้จะเปลี่ยนแปลงปริมาณของ ZrO_2 ระหว่าง 10 - 50 % vol. และความเข้มข้นของแคลเซียมและฟอสฟอรัสจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 1.67 ซึ่งผลที่ได้เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) และ Energy dispersion X-ray Analysis พบว่าเกิด 3 - TCP ขึ้นมาซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

Long, L. [25] ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน (MAO) ในอิเล็กโทรไลต์แคลเซียมอะซิเตด โมโนไฮเดรตและแคลเซียมกลีเซอโรฟอสเฟต ($\text{CaC}_3\text{H}_7\text{O}_6\text{P}$) โดยใช้ความต่างศักย์ระหว่าง 190 ถึง 600 โวลต์ เป็นเวลา 3 นาที พบว่าลักษณะชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้นกับความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน ดังนี้ความต่างศักย์ 190 โวลต์ เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์บางมากที่เป็นรูพรุนและมีลักษณะสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวความต่างศักย์ 230 โวลต์ ชั้นฟิล์มออกไซด์มีลักษณะเป็นรูพรุนไม่สม่ำเสมอความต่างศักย์ 270 โวลต์ ชั้นฟิล์มออกไซด์มีลักษณะเป็นรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ 350 โวลต์ ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นและมีรอยแตกที่ผิวผลการวิจัยแสดงว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นความขรุขระความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์และปริมาณไอออนแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่ปนอยู่ในชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นและเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนจากแอนาเทส (Anatase) เป็นรูไทล์ (Rutile) เมื่อนำมาทดสอบสมบัติในทางชีวภาพโดยการแช่ในเซลล์กระดูก (MG63) และเซลล์ Humam Osteosarcoma (HOS) พบว่าความขรุขระและปริมาณไอออนแคลเซียมและไอออนฟอสฟอรัสที่ปนอยู่ในชั้นฟิล์มออกไซด์มีผลต่อการตอบสนองของเซลล์

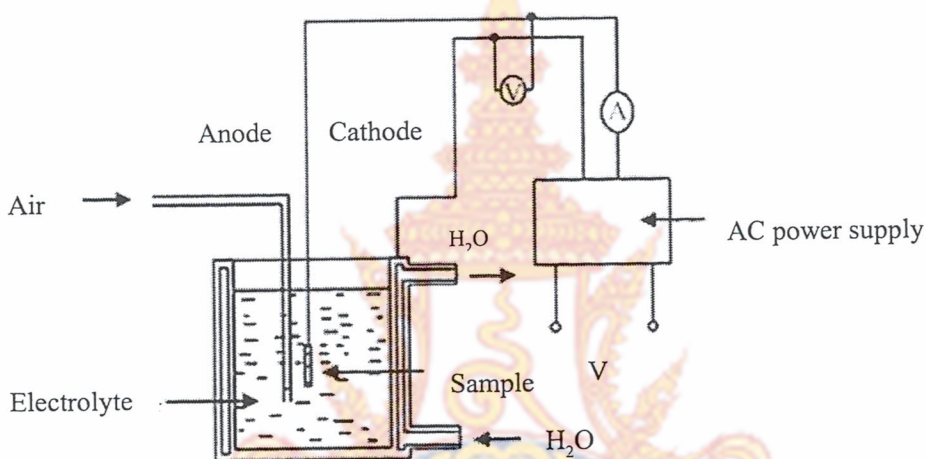
Liu, F. [26] ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์ในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน pH ของอิเล็กโทรไลต์และกระบวนการทางความร้อน (Hydrothermal Process) ต่อลักษณะสัณฐานและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบแคลเซียมฟอสฟอรัสบนไทเทเนียม โดยชั้นเคลือบที่เตรียมด้วยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมกลีเซอโรฟอสเฟต (Calcium Glycerophosphate) และแคลเซียมอะซิเตด โมโนไฮเดรต (Calcium Acetate Monohydrate) ที่ปรับค่า pH ระหว่าง 11 ถึง 11.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และความต่างศักย์ในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันเท่ากับ 250 และ 350 โวลต์จากนั้นนำไทเทเนียมที่ผ่านการเตรียมชั้นเคลือบผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ผลของงานวิจัยแสดงว่าปัจจัยข้างต้นมีผลต่อลักษณะเป็นรูพรุนและขรุขระทั่วทั้งพื้นผิวมากไปกว่านี้ ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้นและชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน จะเกิดการตกตะกอนของเกิดไฮดรอกซีอะพาไทท์ในชั้นฟิล์มออกไซด์และอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.71 นอกจากนี้พบว่า pH สูงขึ้นจะเกิดไฮดรอกซีอะพาไทท์บนพื้นผิวมากขึ้นด้วย

Sun, J., Han, Y. & Huang, X. [27] ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์และเวลาในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันต่อ องค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์บนโลหะผสมไทเทเนียม โดยชั้นเคลือบเตรียมด้วยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันในอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยอะซิเตตโมโนไฮเดรต (Acetate Monohydrate) และเบต้ากลีเซอโรฟอสเฟตไดโซเดียมซอลที่เพนตะไฮเดรต (Glycerolphos Phate Disodium Salt Pentahydrate) ให้ความต่างศักย์ระหว่าง 400 ถึง 480 โวลต์ เป็นเวลา 5 ถึง 20 นาที จากงานวิจัยเมื่อใช้ความต่างศักย์ในกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันนั้นข้างต้นเป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มออกไซด์ประกอบด้วยเฟสรูไทล์เฟสแคลเซียมไททานเนตและไฮดรอกซีอะพาไทต์แต่เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นองค์ประกอบของฟิล์มเปลี่ยนไปดังนี้เฟสรูไทล์และเฟสแคลเซียมไททานเนตลดลงแต่เฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มขึ้นกรณีที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 480 โวลต์ เป็นเวลา 1.5 นาที ฟิล์มออกไซด์ประกอบด้วยเฟสรูไทล์และเฟสแคลเซียมไททานเนตและเมื่อเวลาในการเตรียมชั้นเคลือบมากขึ้นเฟสดังกล่าวลดลงและพบไฮดรอกซีอะพาไทต์และแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นขนาดของรูพรุนบนพื้นผิวลดลง ดังนั้นเวลาและความต่างศักย์ของกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์

Daqing, W. & Zhou Y. [28] ได้รวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์และวิเคราะห์ชั้นเคลือบแคลเซียมฟอสเฟตบนพื้นผิวโลหะที่เตรียมด้วยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันในอิเล็กโทรไลต์เกลือแคลเซียมต่าง ๆ เช่น แคลเซียมอะซิเตตเบต้ากลีเซอโรฟอสเฟตไดโซเดียมซอลเพนตะไฮเดรต แคลเซียมอะซิเตตโมโนไฮเดรต แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) แคลเซียมฟิโรฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และสารประกอบเชิงซ้อนของแคลเซียม เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (Ca - EDTA) พบว่าส่วนประกอบในอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อปริมาณของแคลเซียมและฟอสฟอรัสของชั้นเคลือบออกไซด์บนพื้นผิวไทเทเนียม ในการทำกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันใช้ความต่างศักย์ 250 ถึง 500 โวลต์ พบว่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นมีผลต่อลักษณะสัญญาณวิทยาและความหนาของชั้นเคลือบเมื่อเพิ่มเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA) จะเป็นตัวขัดขวางการตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน ผลจากงานวิจัยแสดงว่าเวลาความต่างศักย์องค์ประกอบและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อ โครงสร้างของชั้นเคลือบออกไซด์ลักษณะสัญญาณของพื้นผิวจำนวนและขนาดของรูพรุน

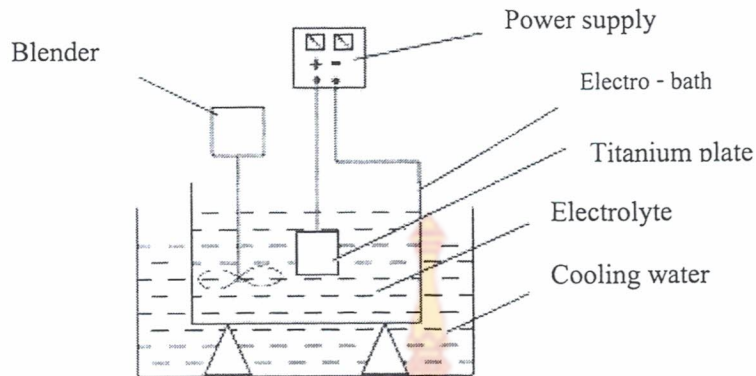
2.2 กระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน

2.2.1 การเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์บนโลหะไทเทเนียม (Ti_6Al_4) ด้วยกระบวนการการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation Technique, PEO) ซึ่งได้ใช้แผ่นโลหะไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดและใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทดแล้วได้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารละลายที่เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์คือแคลเซียมอะซีเตตเบตา แคลเซียมกลีเซอโรฟอสเฟตและน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งเคลือบด้วยกระบวนการ PEO ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับกำลังไฟฟ้า 100 กิโลวัตต์ [29]



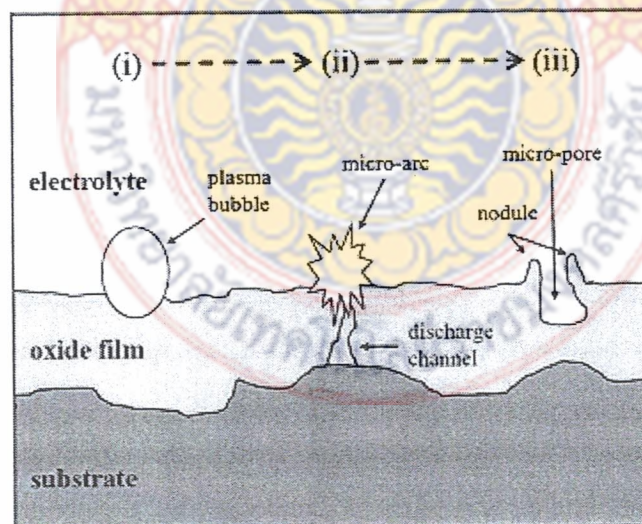
รูปที่ 2.1 กระบวนการ PEO [29]

2.2.2 การเคลือบผิวบนชิ้นงานไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมอะลูมิเนตด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation Technique) โดยไฟฟ้ากระแสตรงกำลังไฟฟ้าที่ 350 โวลต์ อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส [30]



รูปที่ 2.2 กระบวนการ PEO [30]

2.2.3 กระบวนการพ่นผิวทางไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการเกิดฟิล์มออกไซด์บนแผ่นโลหะ โดยส่วนใหญ่แล้วแผ่นโลหะที่ใช้ทำการเคลือบได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม แมกนีเซียม ไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งผลจากการเคลือบด้วยกระบวนการนี้จะได้ชั้นฟิล์มที่มีความหนาอยู่ในช่วง 10 - 100 ไมโครเมตร โดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่เคลือบผิวที่ง่ายและพื้นผิวเคลือบมีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนและการสึกหรออีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่เพิ่มพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบ [31]



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองของการเกิดความขรุขระของชั้นผิวเคลือบด้วยกระบวนการ PEO [31]

2.3 สารเคลือบเชื่อมฟอสเฟต

สารเคลือบเชื่อมฟอสเฟตเป็นสารที่กำลังได้รับความสนใจในการทำวิจัยและการพัฒนาในสาขาชีววัสดุ (Biomaterials) เพื่อการประดิษฐ์วัสดุฝังในร่างกายขึ้นมาใช้งานทางคลินิก โดยเฉพาะวัสดุเซรามิกชีวภาพ (Bioceramics) ที่ได้รับการอนุญาตให้สามารถใช้ทดแทนส่วนต่าง ๆ ของร่างกายสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.3.1 วัสดุที่ไม่มีอิทธิพลใด ๆ ต่อเนื้อเยื่อที่อยู่รอบ ๆ วัสดุกลุ่มนี้ถูกใช้งานด้วยการฝังเข้าไปในร่างกายสิ่งมีชีวิตเรียกว่า *In vivo Tests* โดยวัสดุเซรามิกกลุ่มแรกที่ถูกใช้ในทางคลินิก คือ อะลูมินา และเซอร์โคเนีย

2.3.2 วัสดุที่สามารถยึดติดกับเนื้อเยื่อของกระดูกได้ (Bioactive) เมื่อวัสดุกลุ่มนี้สัมผัสกับของเหลวในร่างกายจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้กระดูกงอกขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทนกระดูกส่วนที่เกิดความบกพร่องเรียกว่า *In vitro Tests* โดยวัสดุเซรามิกที่จะนำไปใช้งานในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตต่าง ๆ สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชีวภาพเกลือฟอสเฟตของแคลเซียมที่มีการนำมาใช้งานและไม่เป็นพิษในร่างกาย

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุทางชีวภาพมีการพัฒนาวัสดุที่สามารถนำมาทดแทนกระดูกซึ่งวัสดุเซรามิกประเภทแคลเซียมฟอสเฟตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารพวกไบโอแอคทีฟ (Bioactive) และไบโอคอมแพททิเบิล (Biocompatible) เฟส (Phase) หลักของสารประเภทแคลเซียมฟอสเฟตที่พบคือไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$: Hap) แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: TCP) และแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: DPCD) ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์และแคลเซียมฟอสเฟตเป็นสารหลักที่นำมาใช้เป็นวัสดุประเภทนี้ โดยที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีคุณสมบัติที่ไม่เสื่อมสลายทางชีวภาพ (Nonbiodegradation) แต่แคลเซียมฟอสเฟตเป็นใช้แทนที่กระดูกแล้วสามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradation) การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำได้หลายวิธีที่ทราบกันเป็นอย่างดีได้แก่ ไฮโดรเทอร์มอล โซล-เจล การตกตะกอนและโซโนเคมีคัล เป็นต้น

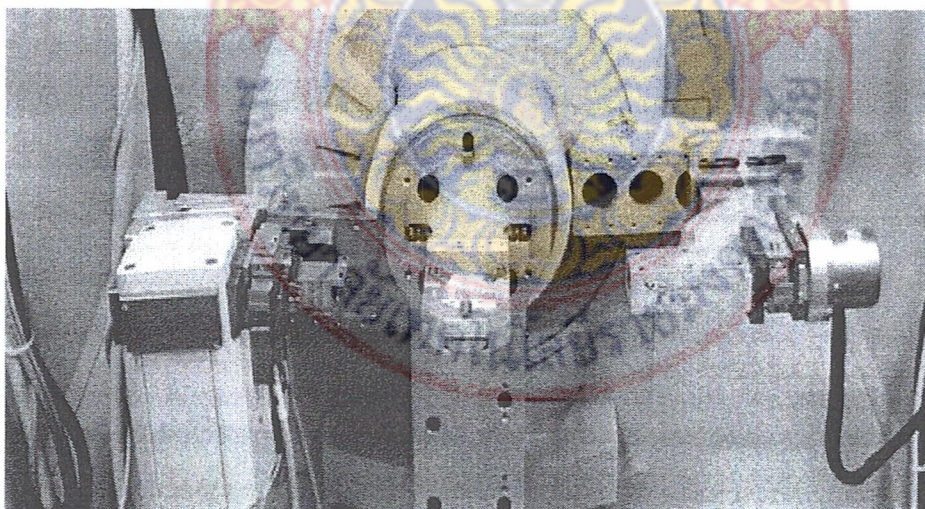
กระดูกเป็นเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากองค์ประกอบหลัก คือ คอลลาเจนไฟเบอร์ ประมาณ 20% น้ำหนักแคลเซียมฟอสเฟตประมาณ 70% โดยน้ำหนักและสารอินทรีย์อื่น ๆ เช่น โปรตีน น้ำตาล และไขมัน ประมาณ 10% โดยน้ำหนักคอลลาเจนมีเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งอยู่ในรูปไมโครไฟเบอร์ลักษณะเหมือนตาข่ายส่วนแคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปผลึกและออสติออนของไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นองค์ประกอบที่ช่วยทำให้กระดูกแข็งแรง

2.4 สารไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite , H_{ap}) จัดเป็น Bioactive Material ซึ่งมีการผลิตออกมาจำหน่ายในตลาดโลกสูงถึงปีละ 24 ล้านล้านดอลลาร์ ประมาณ 55 % ของมูลค่านี้เป็นการนำไปใช้ด้านฟันและกระดูก เช่น ทำฟันเทียมในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกและสามารถเกิดพันธะเคมีกับกระดูกได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการศึกษาการใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์และเกลือแคลเซียมฟอสเฟตในทางการแพทย์อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นวัสดุค้ำทันตกรรมและการใช้แทนกระดูก โดยถ้ามีการพัฒนาการผลิตไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติที่เหลือได้ก็จะสามารถพัฒนาให้เกิดประโยชน์ที่มียั่งยืนต่อไป [32]

2.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [33]

เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลหรือโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) ของสารประกอบต่าง ๆ การวิเคราะห์นี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กันและความรู้เกี่ยวกับ โครงสร้างผลึก (Crystallography) เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non – Destructive Analysis) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [33]

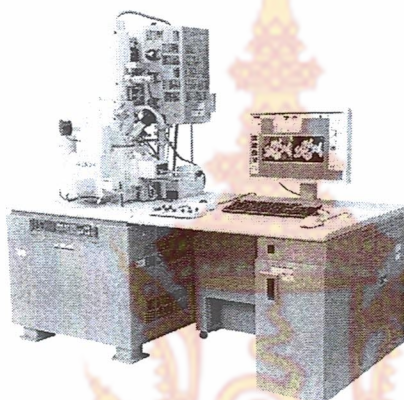
หลักการทํางานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์อาศัยรังสีเอกซ์ซึ่งมีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก คลื่นที่ใช้มีความยาวคลื่นอยู่ประมาณ 0.5 - 2.5 อังสตรอม ซึ่งเป็นความยาวในช่วงของขนาดอะตอมหรือระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมจะใช้รังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นเดียวส่องไปที่ตัวอย่างวางไว้บนแท่นหมุนทํามุม (θ) 0 - 90 องศา กับตัวอย่างและเครื่องตรวจวัดจะหมุนตามไปด้วยด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วในการหมุนนี้เป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวตรวจวัดจะบันทึกมุมเป็น 2 θ และความเข้มของรังสีเอกซ์ ดังนั้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบผลึกเกิดการกระเจิง (Scattering) โดยการชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก โดยรังสีเอกซ์ที่กระเจิงนั้นยังคงมีค่าความยาวคลื่นที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและเกิดการเสริมสร้างและหักล้างกันของคลื่นการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบนี้เป็นการกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent Scattering) และเรียกการกระเจิงแบบนี้ว่าการกระเจิงแบบแบรกก์ (Bragg Scattering) พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [33]

2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่าจนถึง 500,000 เท่า การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น แสดงดังในรูปที่ 2.6



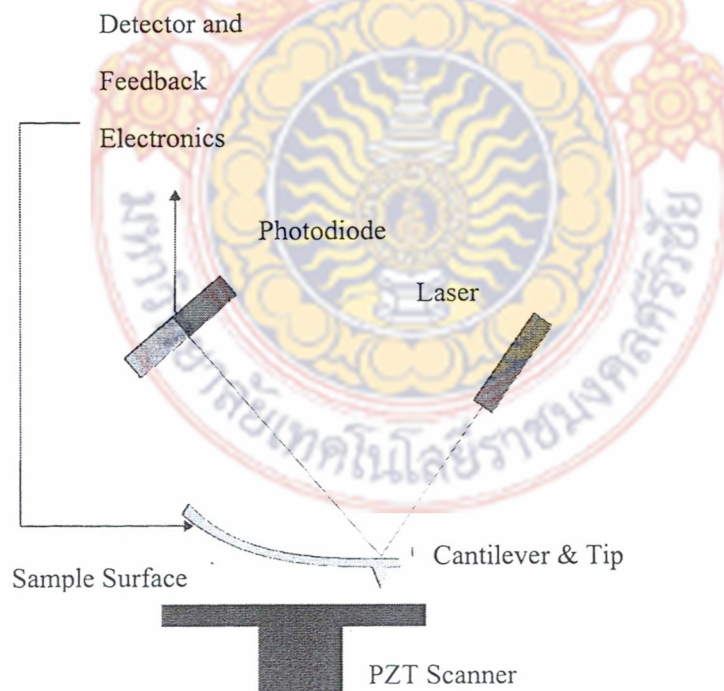
รูปที่ 2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) [34]

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลาอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลาอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการหากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลาอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลาอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลาอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป

2.7 การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรง [35]

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะและความขรุขระของพื้นผิว โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่าง อะตอม (Atomic Force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสารและจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ซึ่งติดอยู่กับคานยื่นที่โค้งงอได้เรียกว่า แคนทิลเวอร์ (Cantilever) แสดงดังในรูปที่ 2.7 โดยโพรบหรือ AFM Tip จะมีรัศมีที่ปลายเข็ม (End Radius) อยู่ในระดับเพียงไม่กี่นาโนเมตรลากส่วนปลายเข็มแหลมไปบนพื้นผิวของตัวอย่างและถูกตรวจวัดได้ด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไปที่ส่วนปลายของคานยื่นและสะท้อนมายังจูดรีบแสง (Photodiodes) หรือ (Laser detector) สามารถตรวจวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุ ในขณะที่สแกนบนพื้นผิวถูกนำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิวของกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (Monitor)



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม [35]

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (Tip) ของคาน (Cantilever) ที่ยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระຈกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุและเมื่อปลายแหลมลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโนแรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิว ที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพเช่นเดียวกันโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลั เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของ โครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วยวิธีการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่นำมาใช้งานระดับนาโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

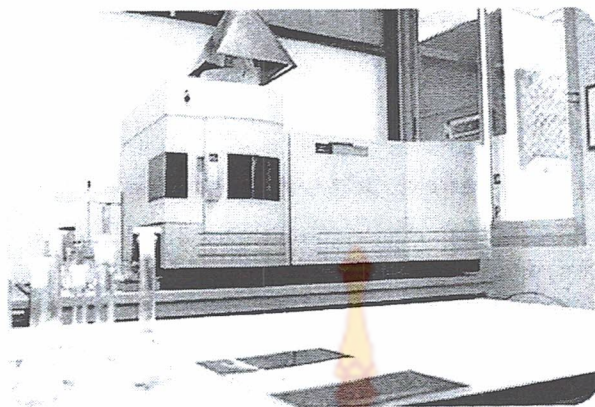
2.7.1 การสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ (Contact Mode) ตลอดเวลาข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2.7.2 การสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้น ๆ (Noncontact Mode หรือ Tapping Mode) ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้นแต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้น ๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคานซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้น ไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้

2.8 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลาย [36]

การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เครื่อง (Inductively Coupled Plasma, ICP) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลาย (ICP) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุโดยการใส่พลาสมาเผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน ซึ่งจะปล่อยแสงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมาแล้ววัดความเข้มของแสงและคำนวณเป็นความเข้มข้นของปริมาณธาตุในตัวอย่าง ICP นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุในสิ่งแวดล้อมและวิเคราะห์สารพิษหรือธาตุอาหารในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร แสดงดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลาย (ICP) [36]

เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลายมักจะเรียกเทคนิคกันอย่างสั้น ๆ ว่า ICP โดยเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุพร้อมกัน (Multi-Element) โดยใช้พลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียส เผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน ซึ่งจะปล่อยแสงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมาแล้ววัดความเข้มของแสงและคำนวณเป็นความเข้มข้นของปริมาณธาตุในตัวอย่างเทคนิคนี้สามารถวัดได้ในระดับ PPB และสามารถวิเคราะห์ธาตุประเภท Refractory Element ได้ทุกตัว ICP มี 2 แบบคือ แบบ Radial และแบบ Axial โดยแบบ Radial จะมีแหล่งกำเนิดช่องนี้ในแนวนอน ซึ่งจะทำให้เพิ่ม Pathlength และลดสัญญาณรบกวนได้ผลก็คือจะได้ Detection Limit ต่ำกว่าแบบ Radial ถึง 5 - 10 เท่า ปัจจุบันมี ICP ชนิด Simultaneous ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันถึง 70 ธาตุในทางทฤษฎีได้ในตัวอย่างเดียวกันโดยใช้เวลาเพียงไม่ถึง 1 นาที โดยไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับค่าความแม่นยำหรือ Detection Limit ในขณะที่ ICP แบบ Sequential จะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ 5 ธาตุต่อนาที

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ในการดำเนินโครงการเพื่อมุ่งศึกษากระบวนการเคลือบโลหะด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพารา และเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีการกำหนดตัวแปรของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลต์ไดออกไซด์ออกเดชัน โดยมีการศึกษาของความขรุขระของพื้นผิว ศึกษาโครงสร้างของธาตุและทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

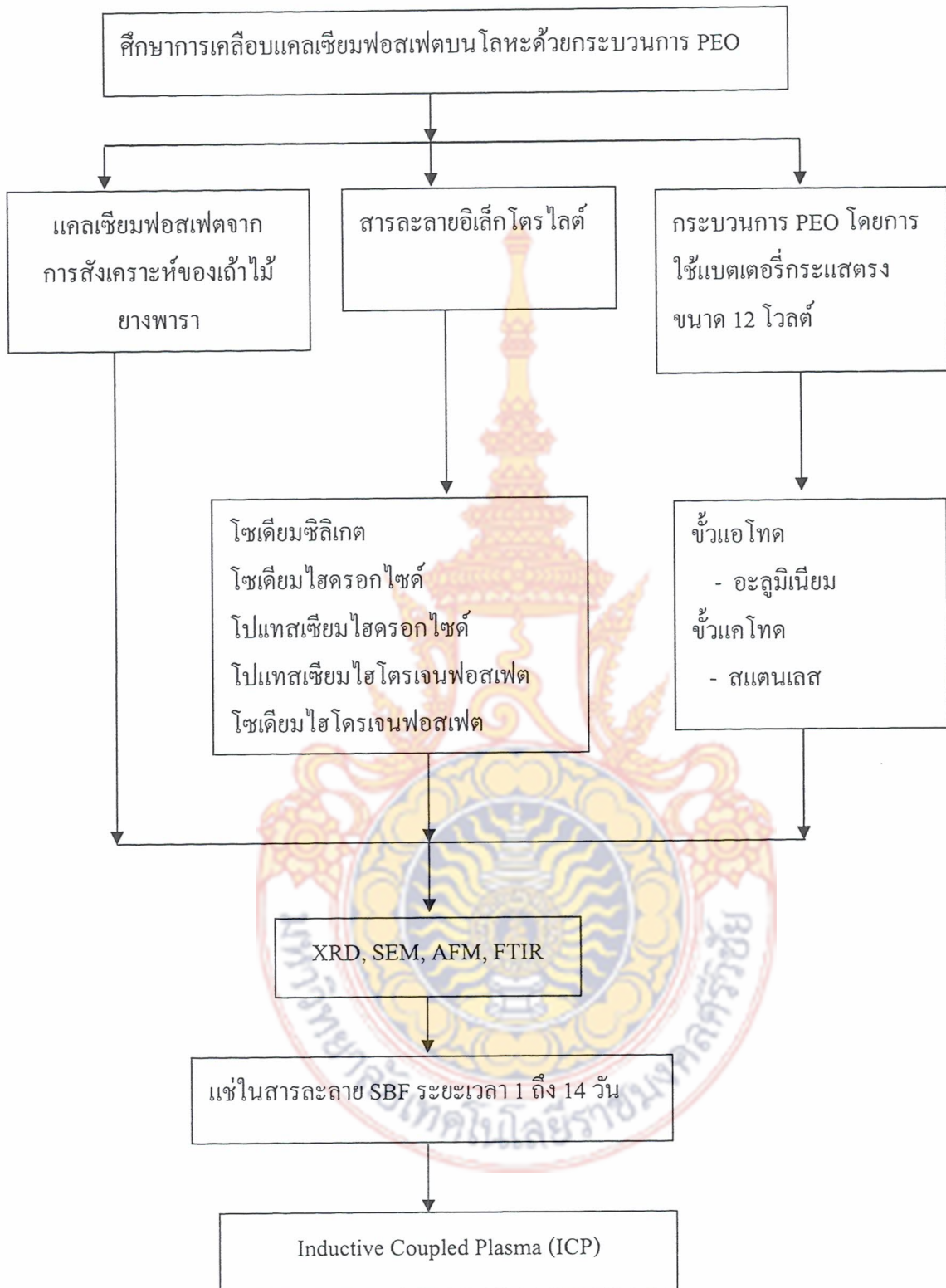
ในการเคลือบโลหะด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จากแก้วไม้อย่างพาราโดยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลต์ไดออกไซด์ออกเดชันมีแผนการดำเนินงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลา	2557			2558				
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		-----	-----						
2. วิเคราะห์วัสดุเบื้องต้น		-----	-----						
3. ทำการเคลือบเซรามิกชีวภาพบนโลหะด้วยกระบวนการ (PEO)				-----	-----				
4. ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ XRD, SEM, AFM, FTIR					-----	-----			
5. ทดสอบในสารละลาย SBF						-----	-----		
6. ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ ICP							-----	-----	
7. รวบรวมข้อมูลและสรุปผล							-----	-----	-----

----- แสดงแผนการดำเนินงาน

_____ แสดงการดำเนินงานจริง



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 แคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถ้ำไม้ยางพารา
- 3.2.2 แคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
- 3.2.3 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)
- 3.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.2.5 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 3.2.6 โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- 3.2.7 โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
- 3.2.8 สารละลายที่เสมือนที่อยู่ในร่างกายมนุษย์ (Stimulated Body Fluid , SBF)
- 3.2.9 น้ำกลั่น



ก) แคลเซียมฟอสเฟตจากถ้ำไม้ยางพารา

ข) แคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 แผ่นสแตนเลสขนาด 25.4×25.4 มิลลิเมตร และขนาด 10×10 มิลลิเมตร

3.3.2 แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 25.4×25.4 มิลลิเมตร และขนาด 10×10 มิลลิเมตร

แสดงดังรูปที่ 3.3

3.3.3 แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมป์ 12 โวลต์

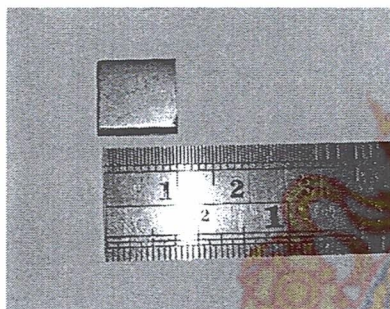
3.3.4 ปีกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.3.5 กระดาษทราย เบอร์ 200 , 400 , 800 และ 1,000

3.3.6 เครื่องซั่งสารเคมี

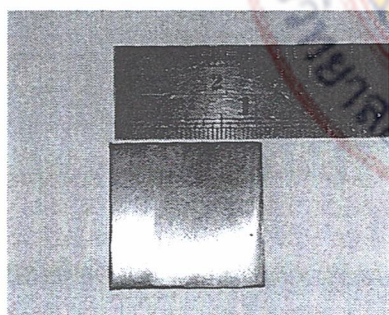
3.3.7 แท่งแก้วคนสาร

3.3.8 ปลั๊กไฟ



ก) สแตนเลสขนาด 10×10 มิลลิเมตร

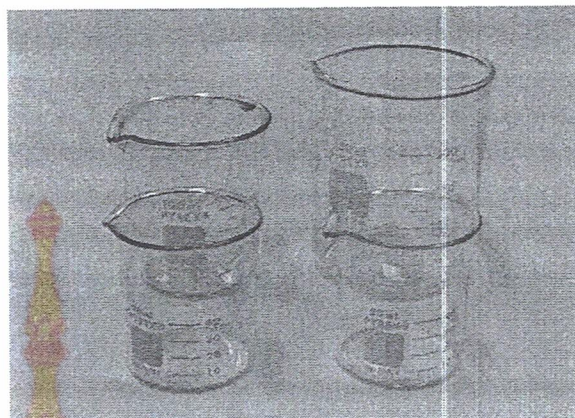
ข) อะลูมิเนียมขนาด 10×10 มิลลิเมตร



ค) สแตนเลสขนาด 25.4×25.4 มิลลิเมตร

ง) อะลูมิเนียมขนาด 25.4×25.4 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.3 แสดงแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นสแตนเลสขนาดต่าง ๆ



ก) แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมป์ 12 โวลต์

ข) ปีกเกอร์

รูปที่ 3.4 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์

3.4.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.4.2 เครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

3.4.3 เครื่องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM)

3.4.4 เครื่องทดสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Fouier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)

3.4.4 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของสารละลาย (Inductively Coupled Plasma, ICP)

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิว

1) ขัดอะลูมิเนียมด้วยกระดาษทราย เบอร์ 200 , 400 , 800 และ 1,000 ตามลำดับ

2) ขัดสแตนเลสด้วยกระดาษทราย เบอร์ 200 , 400 , 800 และ 1,000 ตามลำดับ

3.5.2 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์

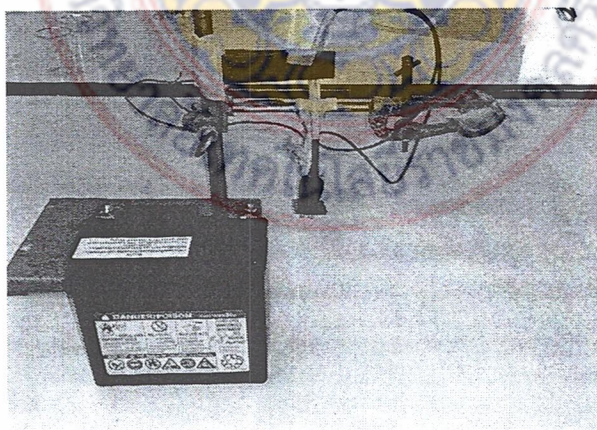
1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) 30 กรัม/ลิตร และโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และผสมสารละลายอย่างละ 20 มิลลิลิตร แล้วเติมสารแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์กับแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา 0.5 กรัม

2) เตรียมสารละลายประกอบด้วยโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 10 กรัม/ลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 3 กรัม/ลิตร และผสมสารละลายอย่าง 20 มิลลิลิตร แล้วเติมสารแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์กับแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา 0.5 กรัม

3) โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 27 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และผสมสารละลายอย่าง 20 มิลลิลิตร แล้วเติมสารแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์กับแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา 0.5 กรัม

3.5.3 วิธีการเคลือบโลหะด้วยการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน

1) ประกอบชุดการทดลองกระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ต่อกับสแตนเลส (Anode) และขั้วลบของแบตเตอรี่ต่อกับอะลูมิเนียม (Cathode) โดยทำการจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในของแต่ละสูตรและเปรียบเทียบระหว่างแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์กับแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา โดยใช้เวลาในการทดลอง 5 นาที



รูปที่ 3.5 การประกอบชุดการทดลองกระบวนการพลาสมาอิเล็กโทรไลติกออกซิเดชัน

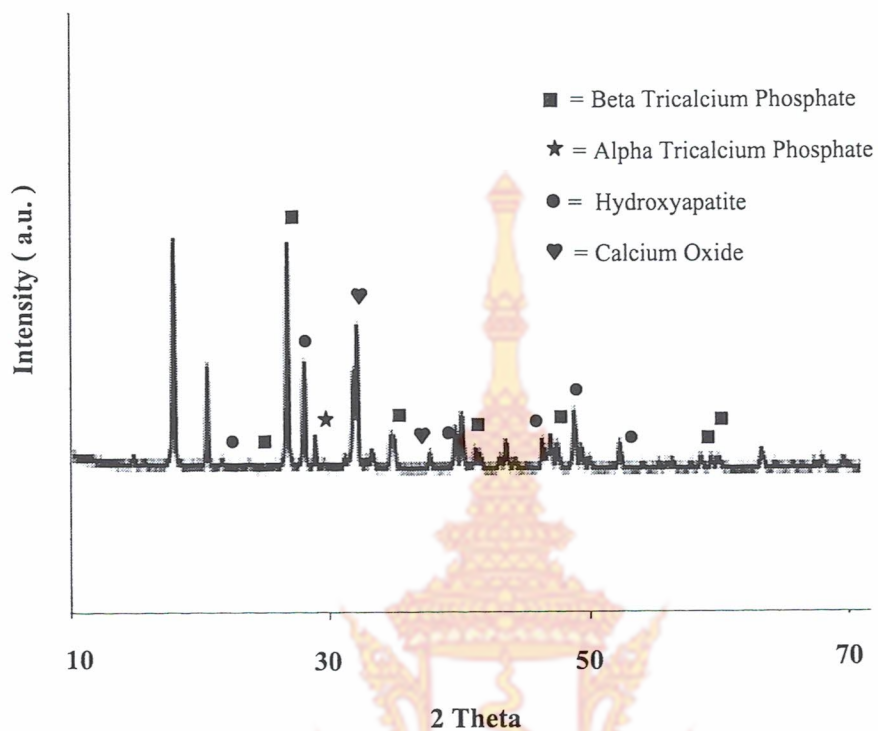
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากการทดลองครั้งนี้ได้นำแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเก้าไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เคลือบบนโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชันในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่าง ๆ จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (X - ray Diffraction, XRD) วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) วิเคราะห์โครงสร้างของการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) วิเคราะห์ลักษณะความขรุขระ ความหนาของพื้นผิวของฟิล์ม (Atomic Force Microscope, AFM) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของธาตุด้วย (X - ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ แสดงดังในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณของสารประกอบอยู่หลายชนิดเช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) และบีตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Beta Tricalcium Phosphate) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่มีปริมาณไม่มากผสมอยู่ด้วย เช่น แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Alpha Tricalcium Phosphate) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ซึ่งมีปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่สูงถึง 38.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanson S. et., al. [37] แสดงดังในตาราง 4.1

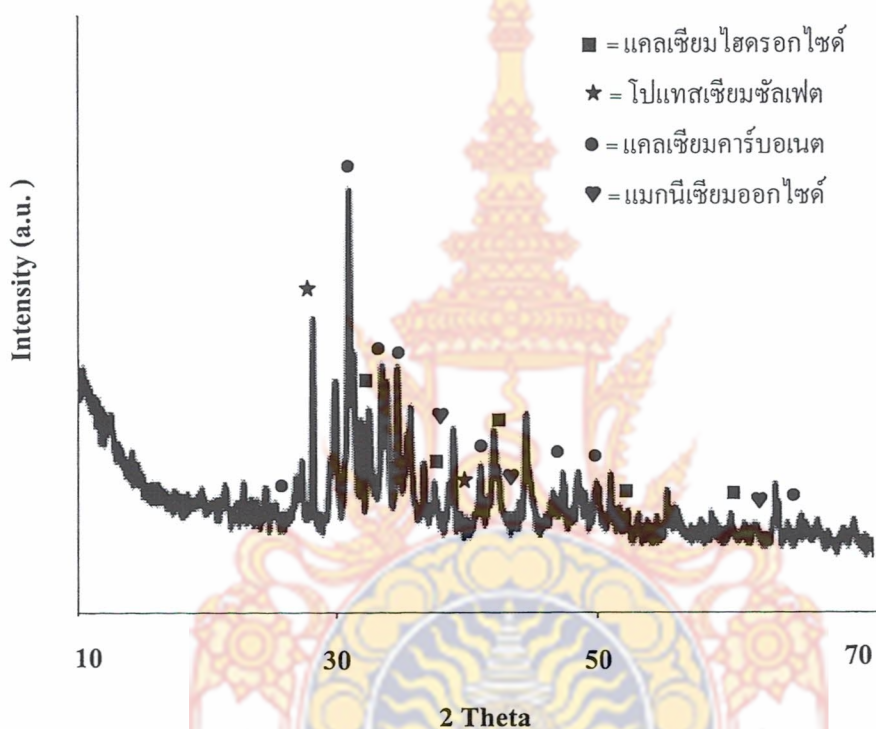


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

แร่/สารประกอบ	ปริมาณ(%)
Beta Tricalcium Phosphate	32.85
Alpha Tricalcium Phosphate	12.53
Hydroxyapatite	38.14
Calcium Oxide	11.46

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถาไม้ยางพารา แสดงในดั่งรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณของสารประกอบอยู่หลายชนิดเช่น แคลไซต์ (CaCO_3) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่มีปริมาณไม่มากผสมอยู่ด้วย เช่น เพอริเคลส (MgO) และอาร์เซไนต์ (K_2SO_4) ซึ่งมีปริมาณแคลไซต์ (CaCO_3) อยู่สูงถึง 88.24 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanson S. et., al. [37] แสดงดังในตาราง 4.2

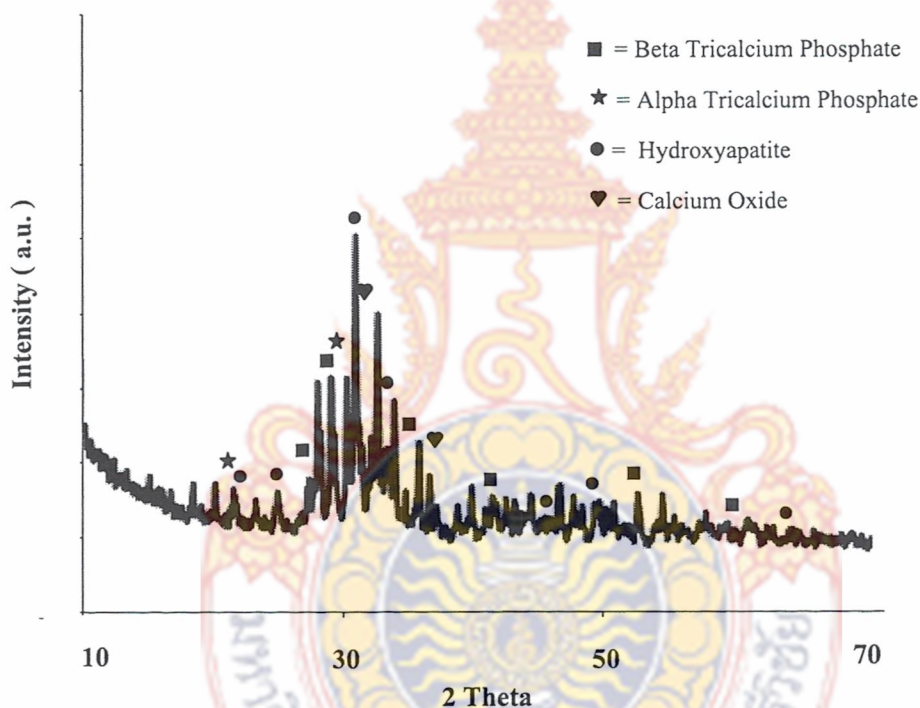


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของแคลเซียมฟอสเฟตจากเถาไม้ยางพารา

ตาราง 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตจากเถาไม้ยางพารา

แร่/สารประกอบ	ปริมาตร(%)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	88.24
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	5.52
แคลเซียมคาร์บอเนต	5.29
แมกนีเซียมออกไซด์	0.52

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถาไม้ยางพารา แสดงดังในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณของสารประกอบอยู่หลายชนิดเช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) และบีตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Beta Tricalcium Phosphate) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่มีปริมาณไม่มากผสมอยู่ด้วย เช่น แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Alpha Tricalcium Phosphate) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ซึ่งมีปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่สูงถึง 37.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanson S. et., al. [37] แสดงดังในตาราง 4.3

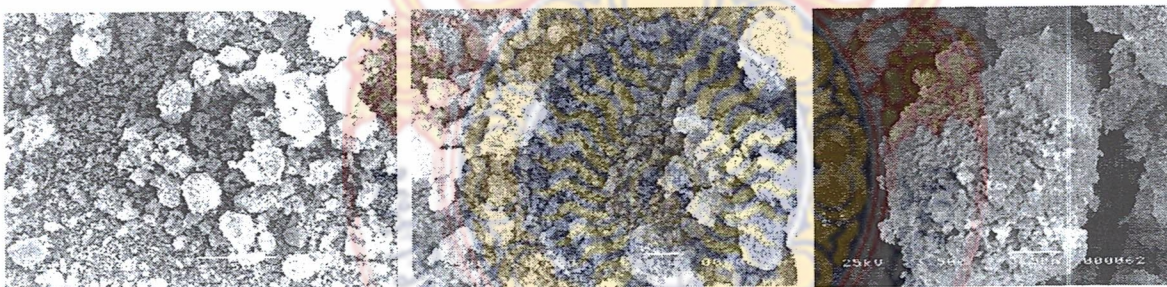


รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถาไม้ยางพารา
ตาราง 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถาไม้ยางพารา

แร่/สารประกอบ	ปริมาณ(%)
Beta Tricalcium Phosphate	36.78
Alpha Tricalcium Phosphate	13.62
Hydroxyapatite	37.14
Calcium Oxide	12.30

4.2 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตที่ผลิตจากเถ้าไม้ยางพาราด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ผลการวิเคราะห์หัตถุคิบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า 1,000 เท่า และ 35,000 เท่าตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หัตถุคิบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดระหว่างเถ้าไม้ยางพาราที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเถ้าไม้ยางพาราที่ผสมกับฟอสฟอริกเพนทอกไซด์ที่อัตราส่วน 10 : 3 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์หัตถุคิบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเถ้าไม้ยางพาราที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Trinkunaite-Felsen et., al. [38] ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเถ้าไม้ยางพารามีลักษณะค่อนข้างกลมมีความพรุน และจากการวิเคราะห์หัตถุคิบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเถ้าไม้ยางพาราที่ผสมกับฟอสฟอริกเพนทอกไซด์ที่อัตราส่วน 10 : 3 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นได้ว่า แคลเซียมมีลักษณะเป็นอนุภาคและเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายขึ้นไปอีกเป็น 1000 เท่า จะเห็นได้ว่าแคลเซียมมีลักษณะเป็นอนุภาคและเป็นกลุ่มก้อนเล็กใหญ่ผสมกันซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายขึ้นไปอีกเป็น 35,000 เท่า แสดงดังในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าแคลเซียมมีลักษณะอนุภาคกลม ๆ ซึ่งอนุภาคกลม ๆ แต่ละอนุภาคจะมีขนาด 320 - 400 นาโนเมตรโดยประมาณ

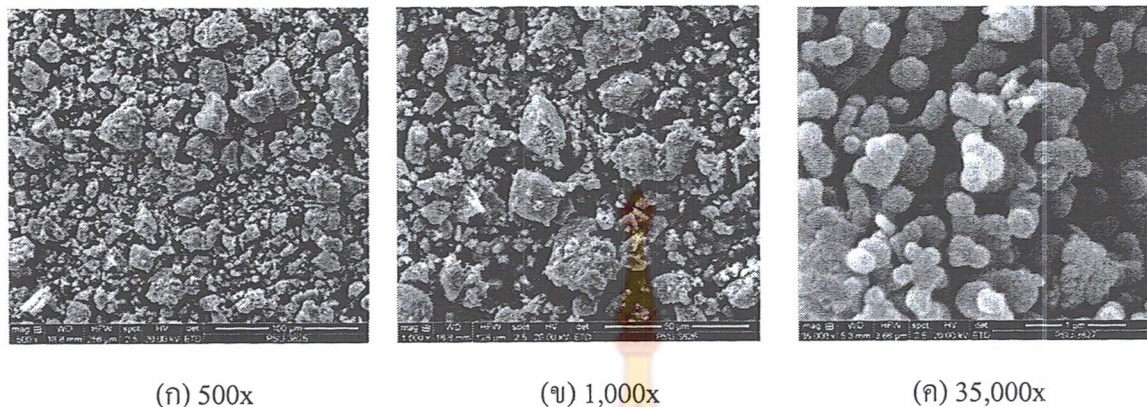


(ก) 500x

(ข) 1,000x

(ค) 3,500x

รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หัตถุคิบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดระหว่างเถ้าไม้ยางพาราที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



(ก) 500x

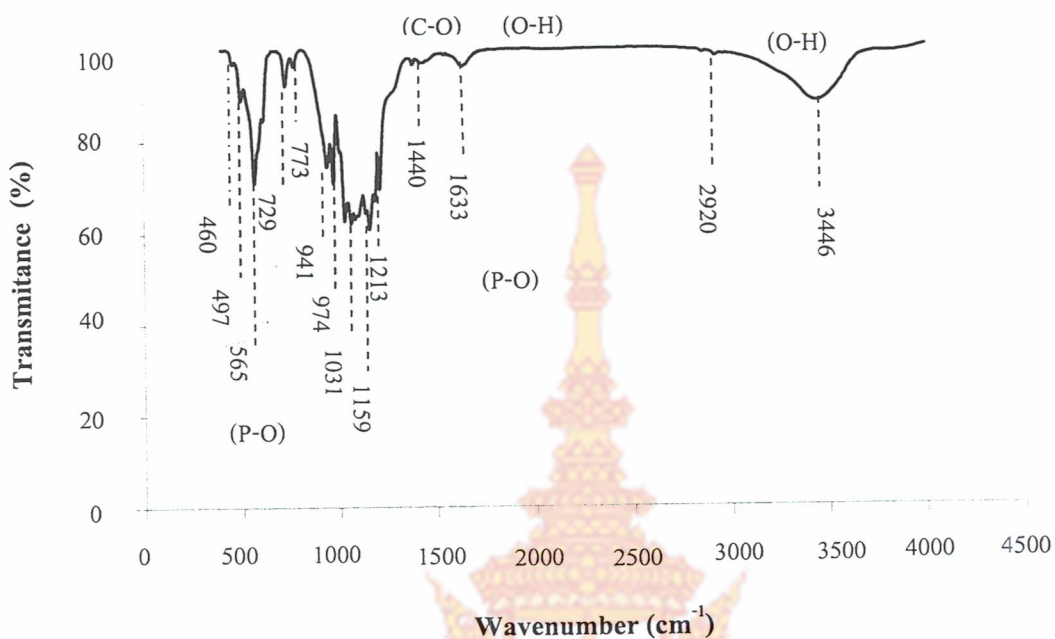
(ข) 1,000x

(ค) 35,000x

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเก้าไม้ยางพาราที่ผสมกับฟอสฟอริกเพนทอกไซด์ที่อัตราส่วน 10 : 3 เหนืออุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ โมเลกุลของสารจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่มีความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของ Functional Groups ในโมเลกุลนั้นๆ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.H. Fathi et., al [39] ปรากฏว่าการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ $460 - 500 \text{ cm}^{-1}$ และช่วงความยาวคลื่นที่ $720 - 780 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่มของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (O-H) การสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ 565 และ $940 - 1,220 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่มของฟอสเฟต PO_4^{3-} (P-O) การสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ $1,430 - 1,640 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ CO_3^{2-} (C-O) การสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ $2,241 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นเพียงเล็กน้อยและเห็นไม่ชัด จะเป็นกลุ่มของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (O-H) และการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ $3,446 \text{ cm}^{-1}$ เป็นกลุ่มของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (O-H) แสดงดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์วัตถุคิด้วยอินฟราเรดของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวชั้นฟิล์มด้วย AFM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา เปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) กับ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม แสดงดังในรูปที่ 4.7 และลักษณะความหนาของชั้นฟิล์ม แสดงดังในรูปที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maciej Sowa et., al [40] โดยแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม้ยางพารา มีค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม 54.93 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 512.14 นาโนเมตร และแผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม 93.06 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 371.74 นาโนเมตร แสดงดังในตาราง 4.4

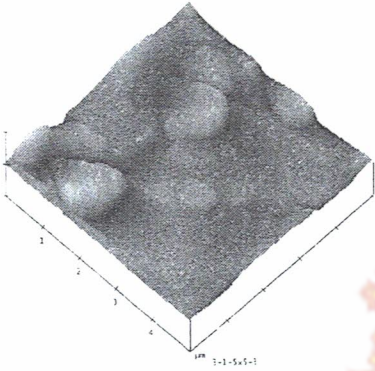
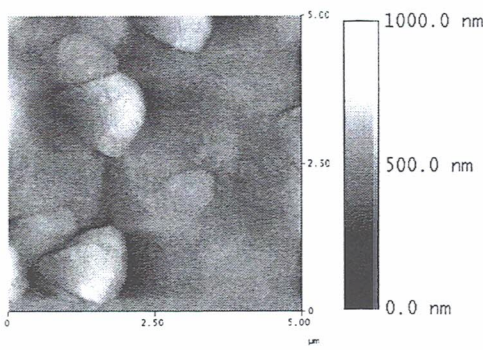
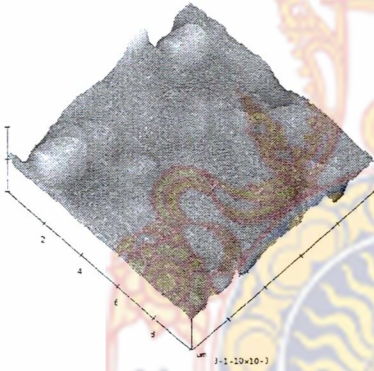
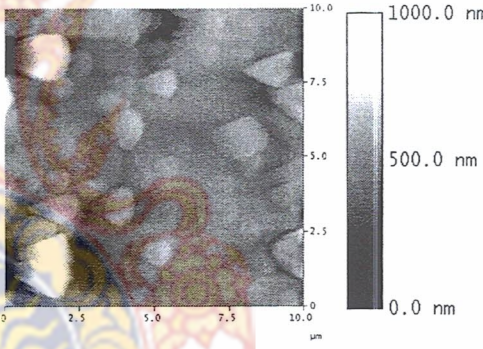
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม แสดงดังในรูปที่ 4.9 และลักษณะความหนาของชั้นฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maciej Sowa et., al [40] โดยแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพารา มีค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม 97.36 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 537.16 นาโนเมตร และแผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม 76.52 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 462.71 นาโนเมตร แสดงดังในตาราง 4.5

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.11 และลักษณะความหนาของชั้นฟิล์ม แสดงดังในรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maciej Sowa et., al [40] โดยแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพารา มีค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม 225.93 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 579.16 นาโนเมตร และแผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม 122.80 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 483.02 นาโนเมตร แสดงดังในตาราง 4.6

จากการวิเคราะห์พื้นผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของแก้วไม้อย่างพาราในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 สูตรดังตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าแผ่นสแตนเลสที่มีพื้นผิวของชั้นฟิล์มมีค่าเฉลี่ยความขรุขระมากที่สุดคือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีความขรุขระของชั้นฟิล์ม 225.93 นาโนเมตร และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าเฉลี่ยของความหนามากที่สุด คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 579.16 นาโนเมตร

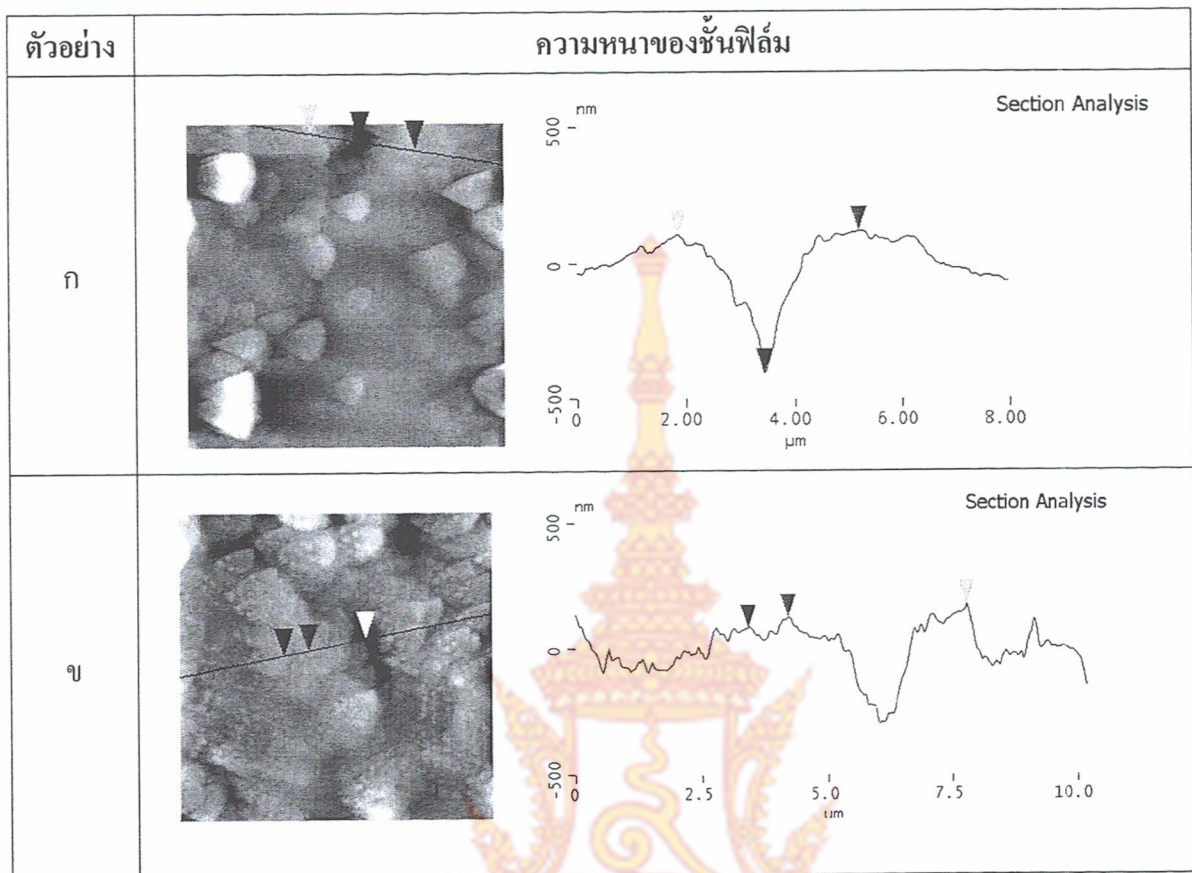
ดังนั้นจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากสังเคราะห์ของถ้ำไผ่บางพารา โดยการใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีค่าเฉลี่ยของความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มมากที่สุด แสดงดังในรูปที่ 4.13 และแสดงดังในรูปที่ 4.14 ตามลำดับ ซึ่งจะสรุปได้ว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีค่ามากกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และมากกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พื้นผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 สูตรดังตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าแผ่นสแตนเลสที่มีพื้นผิวของชั้นฟิล์มมีค่าเฉลี่ยความขรุขระมากที่สุดคือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีความขรุขระของชั้นฟิล์ม 122.80 นาโนเมตร และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าเฉลี่ยของความหนามากที่สุดคือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม 483.02 นาโนเมตร ดังนั้นจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าแผ่นสแตนเลสที่เคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยการใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีค่าเฉลี่ยของความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มมากที่สุด แสดงดังในรูปที่ 4.13 และแสดงดังในรูปที่ 4.14 ตามลำดับ ซึ่งจะสรุปได้ว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีค่ามากกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และมากกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา
 ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
 $\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH

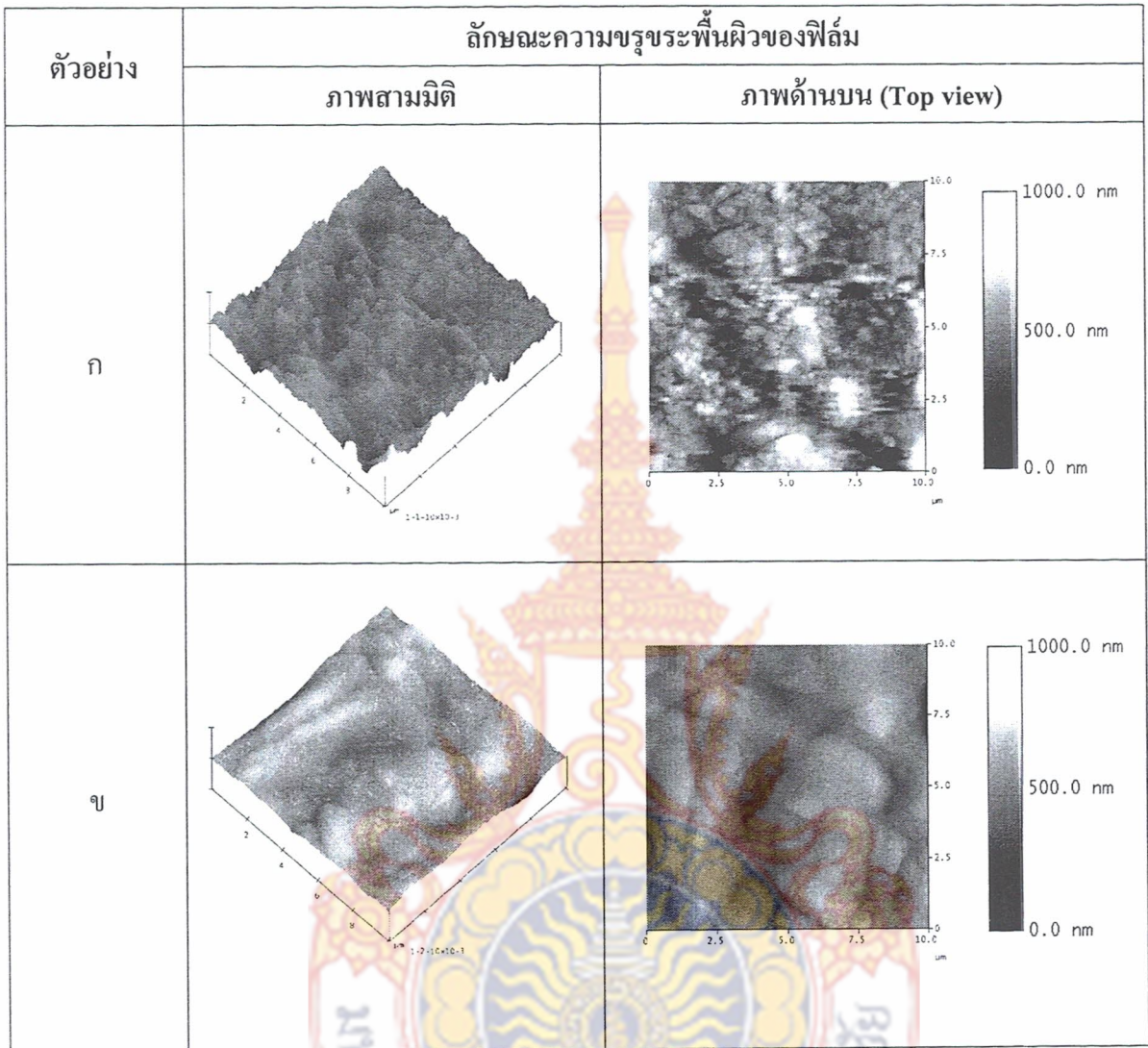


หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา
ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH

ตาราง 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ AFM ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH

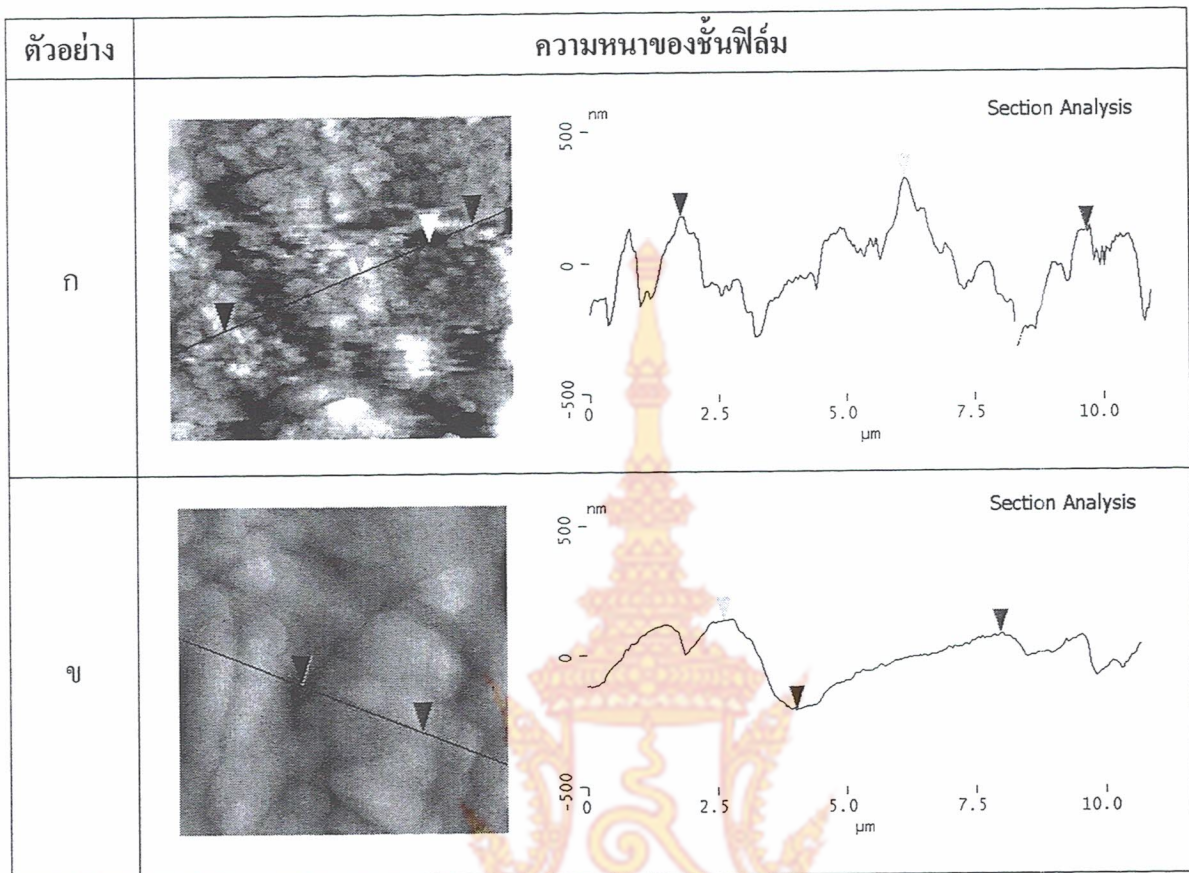
ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความขรุขระของชั้นฟิล์ม (nm)	ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม (nm)
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา	54.93	512.14
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	93.06	371.74



หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถ้ำไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอเล็กโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH



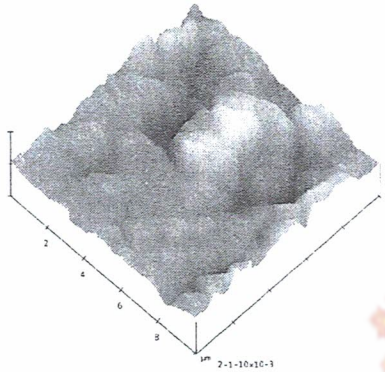
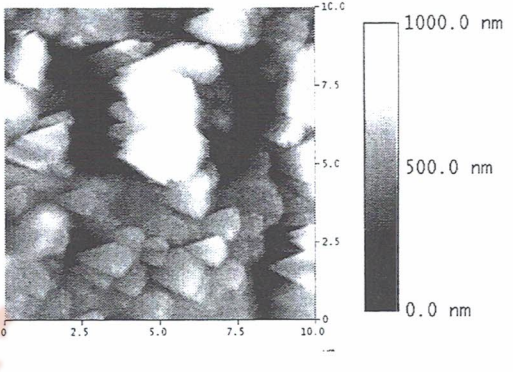
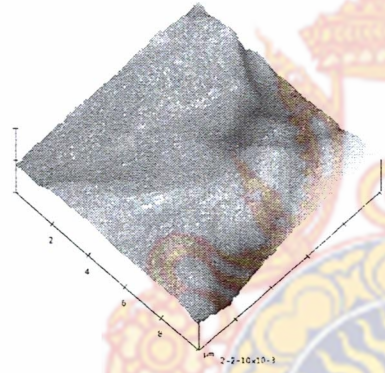
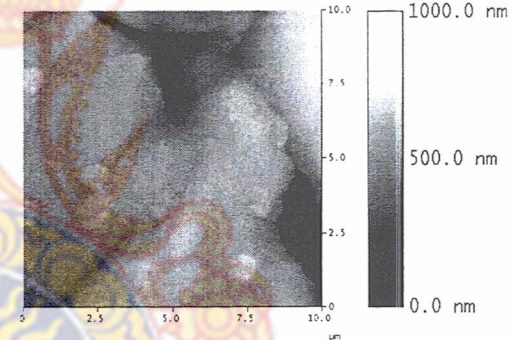
หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถ้ำไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH

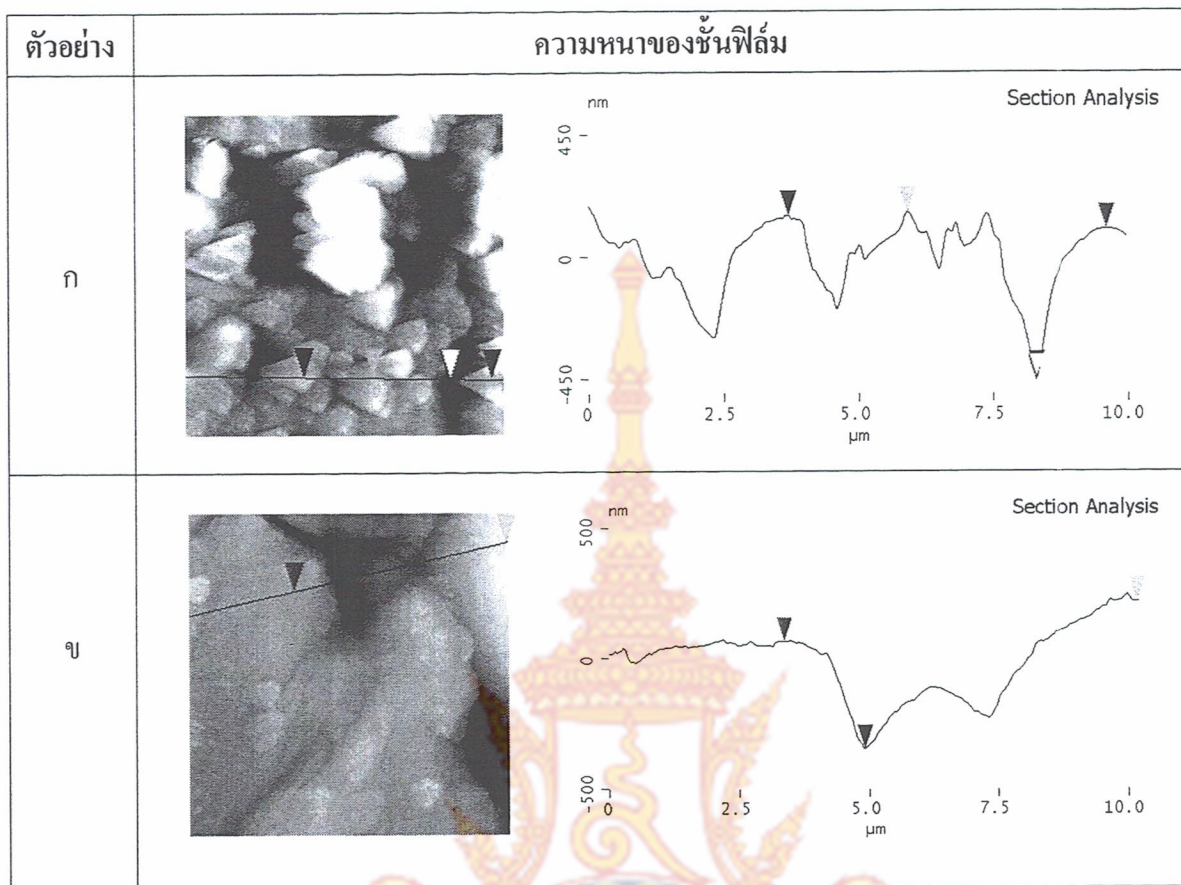
ตาราง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยเครื่องมือ AFM ของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความขรุขระของชั้นฟิล์ม (nm)	ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฟิล์ม (nm)
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถ้ำไม้ยางพารา	97.36	537.16
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	76.52	462.71

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา
 ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอเล็กโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH

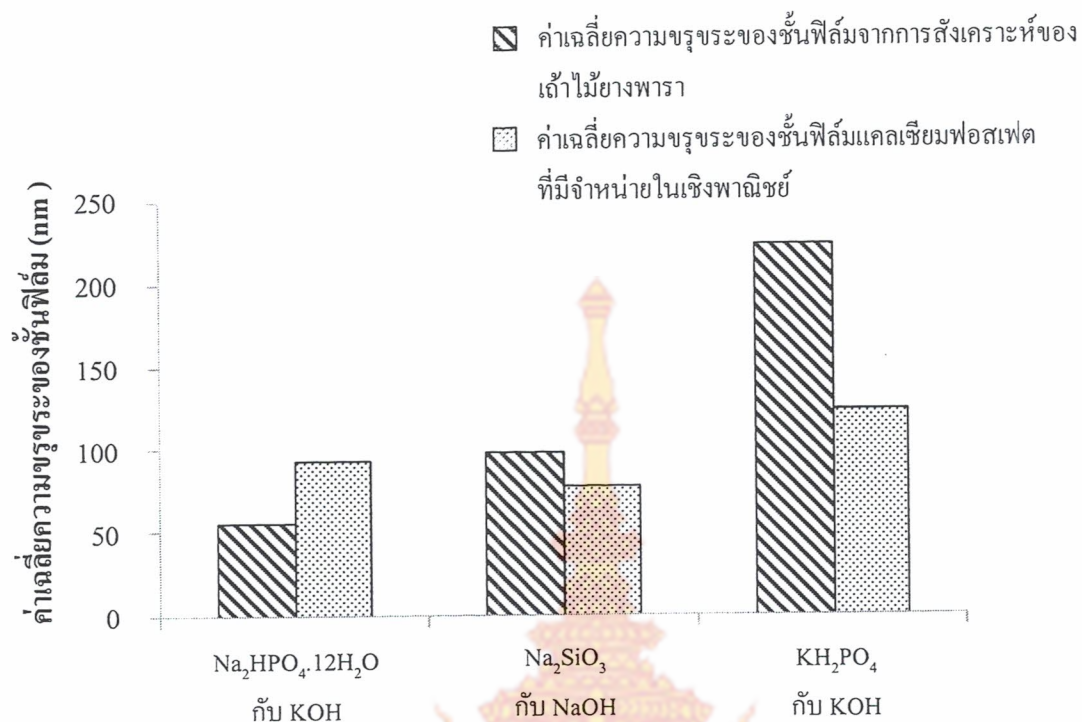


หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา
 ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

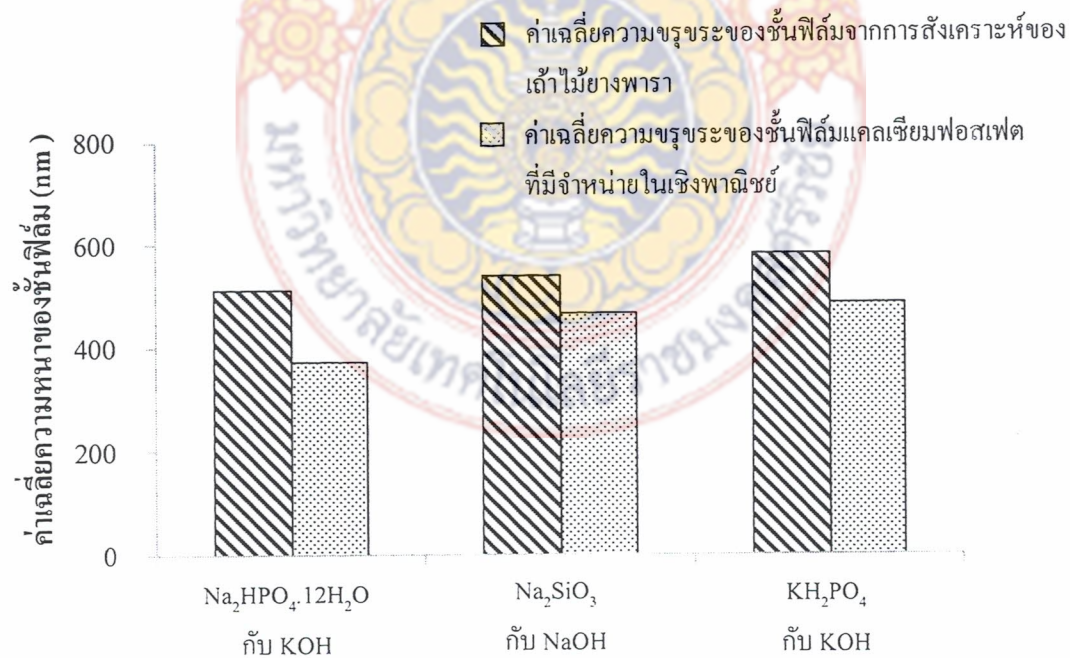
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มขรุขระพื้นผิวของฟิล์มของสารละลาย
 อิเล็กโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH

ตาราง 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ AFM
 ของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความขรุขระ ของชั้นฟิล์ม (nm)	ค่าเฉลี่ยความหนา ของชั้นฟิล์ม (nm)
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจาก การสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา	225.93	579.16
แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่ จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	122.80	483.02



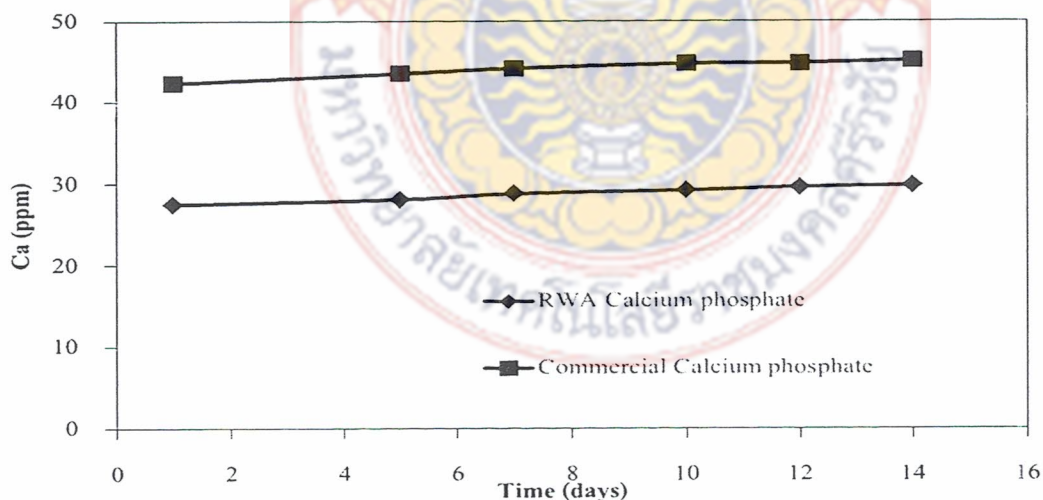
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความขรุขระของชั้นผิวฟิล์ม



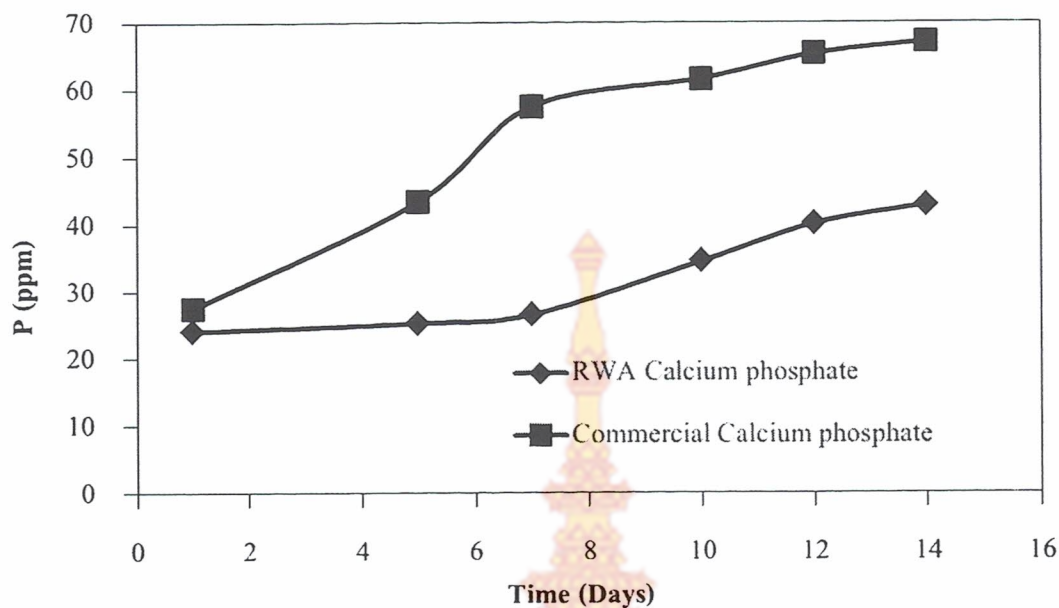
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นผิวฟิล์ม

4.5 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพาราได้กับการเข้ากันได้ ในสารละลายเสมือนร่างกายมนุษย์ (SBF)

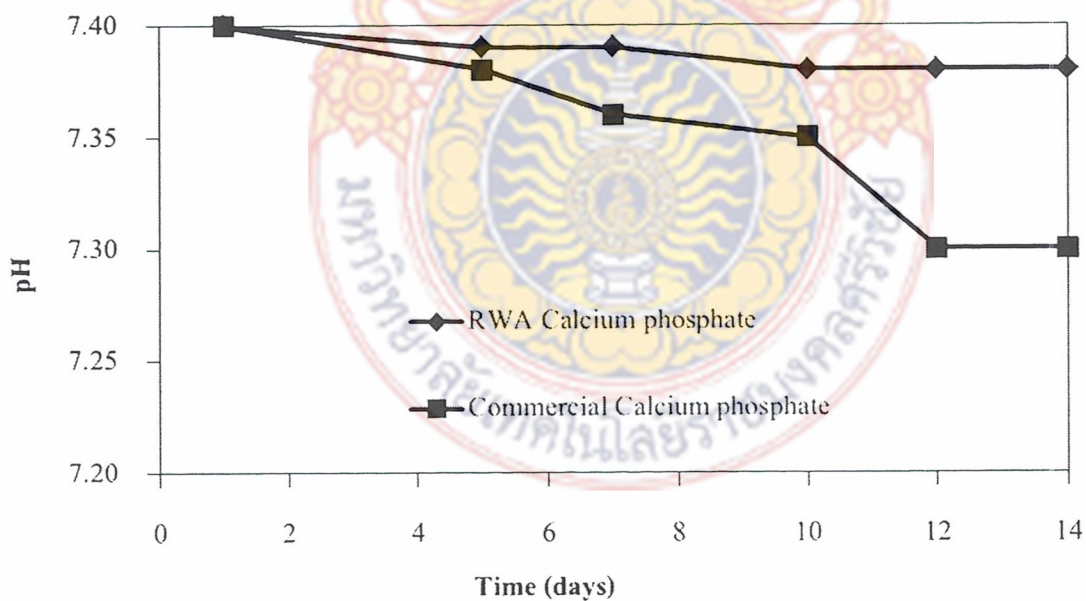
การทดลองจากการแช่แคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพาราและแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในสารละลายเสมือนร่างกายมนุษย์ (SBF) จะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมในสารละลายเสมือนร่างกายมนุษย์ผลปรากฏว่าการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารามีการสลายตัวของแคลเซียมค่อนข้างคงที่เมื่อทำการทดลองเวลาผ่านไป 14 วัน ซึ่งเมื่อเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์จะมีการสลายตัวของแคลเซียมฟอสเฟตสูงกว่า แสดงดังในรูปที่ 4.15 และมีการเปลี่ยนแปลงการของฟอสฟอรัสในสารละลายจะเห็นว่าแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีการสลายตัวมากกว่าแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา แสดงดังในรูปที่ 4.16 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เริ่มต้นคือ 7.4 ลดลงไม่มากนักเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน แสดงดังในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าไม้ยางพารามีการยึดเกาะ (Adhesion) กับวัสดุที่เคลือบแน่นกว่าแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์และมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fathi et., al [39] แสดงให้เห็นการมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับกระดูกของมนุษย์



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าแคลเซียมในสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าฟอสฟอรัสในสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของ แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากถั่วไม้อย่างพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่กำหนดในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของ แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากถั่วไม้อย่างพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่กำหนดในเชิงพาณิชย์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดลองการเคลือบโลหะด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเก้าไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน โดยทำการวิเคราะห์และมีผลสรุปดังต่อไปนี้

แคลเซียมฟอสเฟตสามารถสังเคราะห์ได้จากเศษไม้ยางพาราโดยการผสมกับฟอสฟอริกเพนทอกไซด์ในอัตราส่วน 10:3 ได้ระดับนาโนเมตรผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และยังสามารถนำแคลเซียมฟอสเฟตมาเคลือบบนโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาอิเล็กโตรไลติกออกซิเดชัน (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ได้แก่ 1) $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ผสมกับ KOH 2) Na_2SiO_3 ผสมกับ NaOH 3) KH_2PO_4 ผสมกับ KOH ซึ่งได้ค่าความขรุขระและความหนาของผิวเคลือบของแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเก้าไม้ยางพาราจากมากไปหาน้อยได้แก่ ได้แก่ 1) KH_2PO_4 ผสมกับ KOH 2) Na_2SiO_3 ผสมกับ NaOH 3) $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ผสมกับ KOH ตามลำดับ

ผลการทดสอบการเข้ากันได้ในสารละลายเสมือนร่างกายมนุษย์ (SBF) ของแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเก้าไม้ยางพาราและแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์โดยทดลองเป็นเวลา 14 วัน โดยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีค่าการสลายตัวของแคลเซียมและฟอสฟอรัสสูงกว่าแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเก้าไม้ยางพาราและมี การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายเสมือนในร่างกายมนุษย์ที่เวลาต่างกันของแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากเก้าไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยมีค่า pH อยู่ในช่วงที่สามารถเข้ากับร่างกายในมนุษย์ได้ คือ อยู่ในช่วง 7.20 – 7.40

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ เช่น เครื่องทดสอบ Wear Test เสียไม่จึงสามารถวิเคราะห์ความคงทนของชั้นฟิล์ม ซึ่งทำให้ไม่สามารถอธิบายว่าชั้นฟิล์มที่เคลือบมีความคงทนมากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในด้านของชนิดวัสดุที่ใช้ทดลอง เป็นต้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยต่อไปนักวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 5.2.1 ควรศึกษาความคงทนของชั้นฟิล์มที่เคลือบด้วยเครื่องทดสอบ Wear Test
- 5.2.2 ควรมีการทดสอบการเคลือบกับโลหะอื่นเพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางขึ้น
- 5.2.3 ควรมีการศึกษาร่วมกันได้ในร่างกายมนุษย์เพื่อเป็นประโยชน์ในทางการแพทย์ในอนาคต



บรรณานุกรม

- [1] Callister, W. (2007). **Materials Science and Engineering An Introduction (7th ed.)**.
New York. Materials Science and Engineering An Introduction.
- [2] เซรามิกชีวภาพ[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2553/mat0953st_ch1.pdf.
(วันที่สืบค้น : 21 พฤศจิกายน 2556).
- [3] อนิรุทธ์ คำใจ. (2548). การหาลักษณะเฉพาะและการปรับปรุงสมบัติเชิงของเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์เพื่อใช้ทดแทนกระดูกมนุษย์. คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] พชรวิทย์ วรรณลออ, ศราวุธ สุขเพียร. (2557). การผลิตเคลือบฟอสเฟตไบโอเซรามิกจากเถ้าไม้ยางพารา. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- [5] นิสา จันทร์พวง. (2550). พฤติกรรมในหลอดแก้วของกลาสเซรามิกที่มีเบตาเคลือบฟอสเฟต. บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] สุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์, สุลาวัลย์ ขาวม่วง. (2555). การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโคลด์พลาสมา. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [7] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์. (2544). การพ่นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา. จัดพิมพ์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). กรุงเทพฯ ประเทศไทย.
- [8] พนิกาญจน์ เกตุแก้ว. (2555). การสังเคราะห์และการวิเคราะห์ชั้นเคลือบและฟอสฟอรัสบนไทเทเนียมที่ผลิตโดยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน. สาขาวิชาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยครินทรวิโรฒ.
- [9] พัฒนาเทพชโลธร. (2548). การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีการแมกนีตรอนสปั๊กเทร็งแบบแอคทีฟ. สาขาวิชาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [10] อภิขญา สาริกบุตร, พัฒนะ จันทนาวิวัฒน์, และ ณรงค์ ผังวิวัฒน์. (2552). การเคลือบผิวเหล็กด้วยวัสดุผสมโครเมียม(III)-ฟอสฟอรัส เพื่อด้านทานการกัดกร่อน. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ชวัช นุสนธรา, ชุชาติ นิตปัญญาวงศ์ และ ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์. (2550). การเคลือบโลหะผสมสังกะสี-แมงกานีสบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟฟ้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน.สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [12] วิชาสรี วีริยะรักษ์. (2553). การสังเคราะห์พอลิเอินดีนบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า. หน้า 97 . ภาควิชาเคมีเทคนิค.
- [13] ภาณุสฤณี บุญคำ. (2555). การพัฒนาชุดชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโรเดียม โดยใช้หลักของกายศาสตร์. หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [14] Kalita, S.&Verma, S. (2010). **Nanocrystalline hydroxyapatitebioceramic using microwave radiation.**Synthesis and characterization.Materials Science and Engineering.
- [15] Salih, D., Omer, F.,Isil, K.&Metin, U. (2005). **Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti Al V coated by plasma electrolytic oxidation.** Journal of alloys and compound.
- [16] Guang-xin, T., Ren-ji,Z., Yong-nian, Y. & Zhang-xiao, Z. (2004). **Preparation of porousanatasetitania film.** Materials Letters.
- [17] Shokouhfar, M., Dehghanian, C., Montazeri, M. &Baradaran, A. (2010). **Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance.** Department of Metallurgical and Materials Engineering University of Tehran Tehran Iran.
- [18] Riyad, O., Hussein and Derek O. Northwood. (2014).**Production of Anti-Corrosion Coatings on Light Alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO).** Department of Mechanical.Automotive and Materials Engineering.University of Windsor.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Shokouhfar, M., Dehghanian, C., Montazeri, M. & Baradaran, A. (2011). **Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance: Part II.** Department of Metallurgical and Materials Engineering. University of Tehran.
- [20] Kumar, M., Kwon, H. & Jung H. (2015). **Corrosion protection performance of single and dual Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coating for aerospace applications.** pp 480 – 486 .Materials Chemistry and Physics.
- [21] Dzhurinskiy, D., Gao, Y. & Yeung K. (2015). **Characterization and corrosion evaluation of TiO₂: N-HA coatings on titanium alloy formed by plasma electrolytic oxidation.** Surface and Coatings Technology.
- [22] Zhao Zhong-wei., et al. (2004). **Preparation of Calcium Phosphate Coating on Pure Titanium Substrate by Electrodeposition Method.** pp. 147-151.
- [23] Xiwen, Y., Chen, L. & Zongcheng, Y. (2014). **In-situ fabrication of catalytic metal oxide films in microchannel by plasma electrolytic oxidation.** Surface and Coatings Technology.
- [24] Balamurugan, A., Balossier, G., Kannan, S., Michel, J., Faure, J. and Rajeswari, S. (2007). **Electrochemical and structural characterization of zirconia reinforced hydroxyapatite bioceramic sol-gel coatings on surgical grade 316L SS for biomedical applications.** Ceramics International.
- [25] Long, F., et al. (2004). **Improve Biological Performance of Ti Implants due to Surface Modification by Micro-arc Oxidation.** pp. 2867-2875.
- [26] Liu F., et. al. (2005). **Formation Characterization of Hydroxyapatite on Titanium by Microarc Oxidation and Hydrothermal Treatment.** pp. 100-104
- [27] Sun, J., Han, Y. & Huang X. (2007). **Hydroxyapatite Coatings Prepared by Micro-arc Oxidation in Ca- and P- containing Electrolyte.** pp. 5655-5658. Retrieved August 21. 2006 from <http://www.sciencedirect.com/surface&coatinatechnology>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] Daqing, W. & Zhou, Y. (2011). **Bioactive Microarc Oxidized Ti O₂-based Coatings for Biomedical Implication**. pp. 201-204. Retrieved April, 2011.
- [29] Salih, D., Omer, F., Isil K. & Metin U. (2005). **Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti Al V coated by plasma electrolytic oxidation**. Journal of alloys and compound.
- [30] Guang-xin, T., Ren-ji, Z., Yong-nian Y. & Zhang-xiao, Z. (2004). **Preparation of porous anatase titania film**. Materials Letters.
- [31] Kalita, S. & Verma S. (2010). **Nanocrystalline hydroxyapatite bioceramic using microwave radiation**. Synthesis and characterization. Materials Science and Engineering.
- [32] สารเคลือบเซรามิกฟอสเฟต. (2555). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://www.academia.edu/7291371/Plasma_sprayed_coatings_-_Composites (วันที่สืบค้นข้อมูล : 25 กุมภาพันธ์ 2558).
- [33] วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ. (2543). **เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรคชันเครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [34] แม้น อมรสิทธิ์. (2534). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- [35] Binning, G., Quate, C.F. & Gerber .C. (1986). **Atomic Force Microscope**. *Physical Review Letters* 56. pp. 930-933. Retrieved December 5, 1985, from <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.56.930>.
- [36] เครื่องทดสอบความเข้มของสารละลาย. (2558). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mwit.ac.th/~teppode/rs4.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล : 25 กุมภาพันธ์ 2558).
- [37] Hanson, S. et al. (1996). **Testing Biomaterials**. Biomaterials Science: An Introduction to materials in Medicine. pp. 221-228.
- [38] Samar, J. & Saurabh, V. (2010). **Nanocrystalline hydroxyapatite bioceramic using microwave radiation**. Synthesis and characterization. Materials Science and Engineering: C, 30: 295-303.

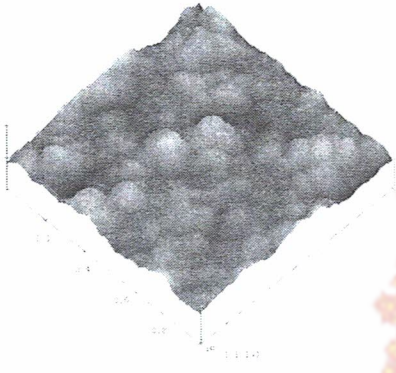
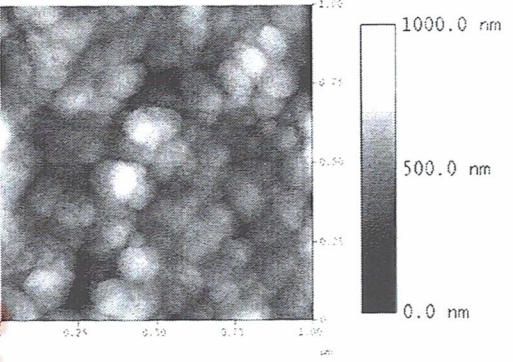
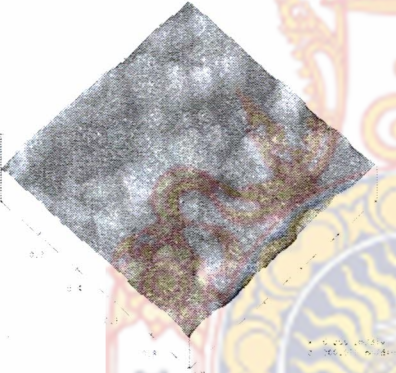
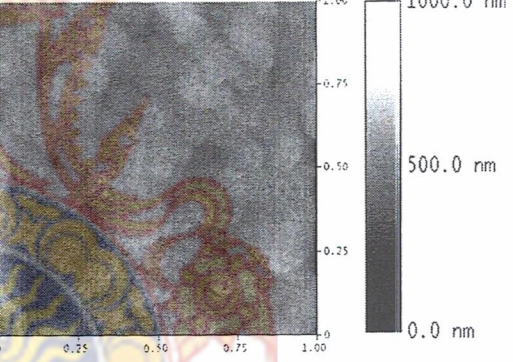
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] Fathi, M.H., Hanifia A. &Mortazavi V. (2008). **Preparation and bioactivity evaluation of bone-like hydroxyapatite nanopowder**. Journal of materials processing technology, 202:536–542.
- [40] Maciej,S., Magdalena, P. & Magdalena, W. (2014). **Bioactivity of coatings formed on Ti–13Nb–13Zr alloy using plasma electrolytic oxidation**.Faculty of Chemistry, Silesian University of Technology.



ภาคผนวก ก
ลักษณะความรูขระของชั้นฟิล์มที่กำลังขยาย 1×1เท่า



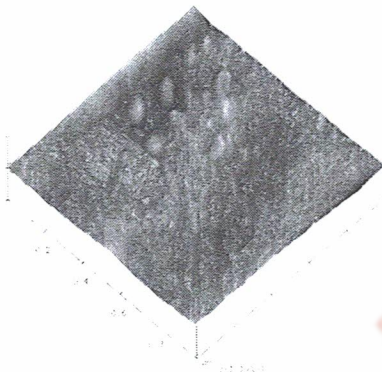
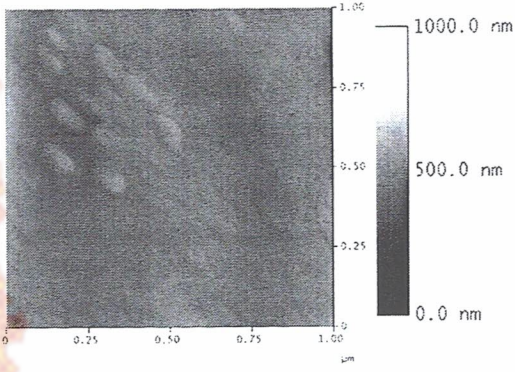
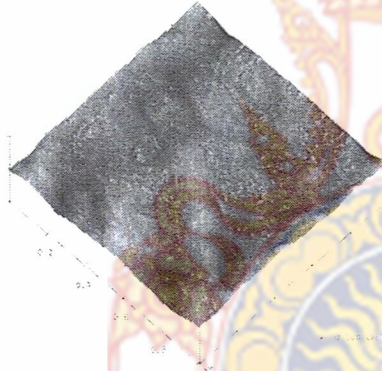
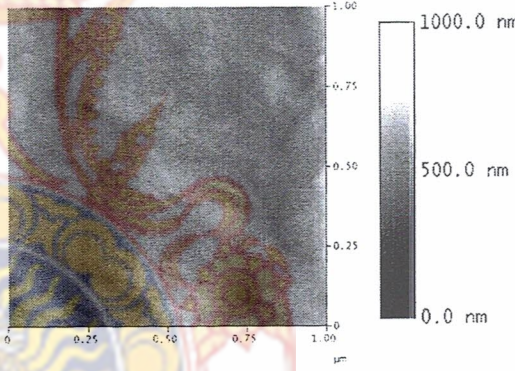
ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ก.1 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

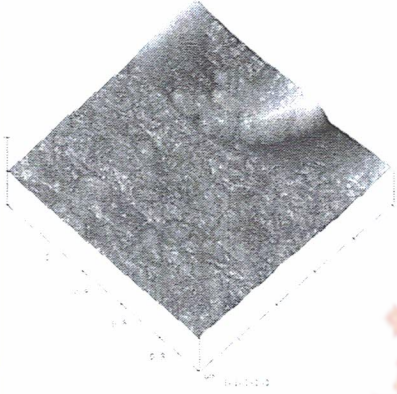
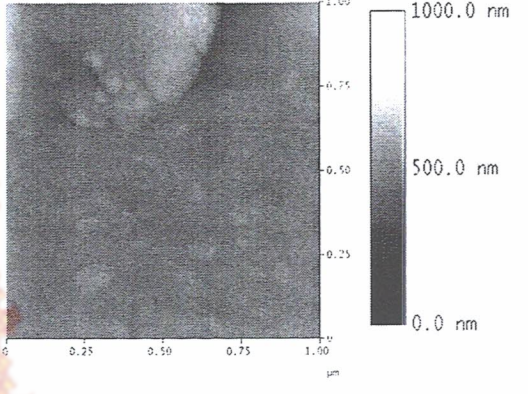
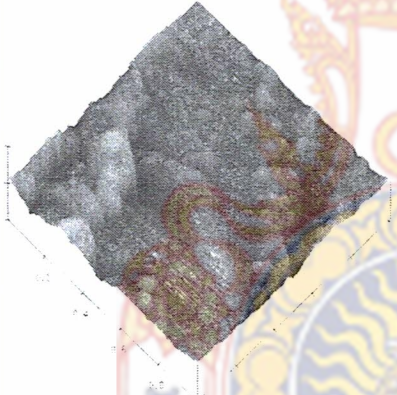
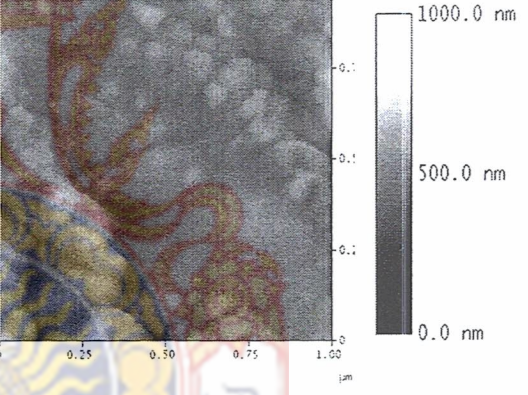
$\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถ้าไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ก.2 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

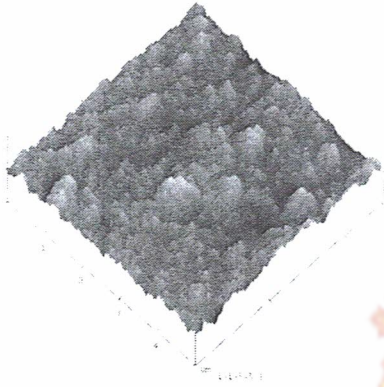
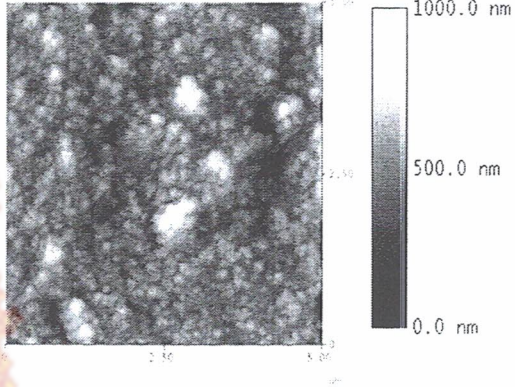
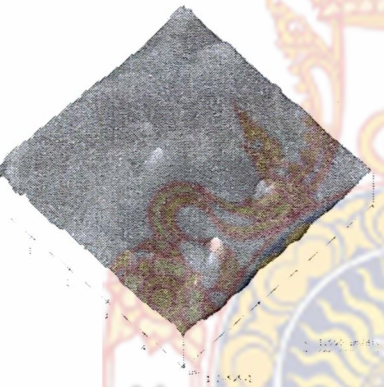
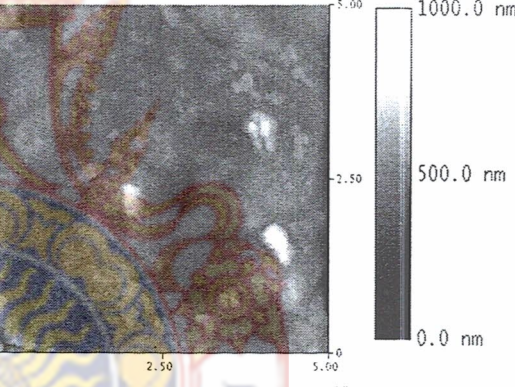
หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั่วไม่ย่างพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ก.3 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH

ภาคผนวก ข
ลักษณะความรูขระของชั้นฟิล์มที่กำลงขยาย 5×5 เท่า



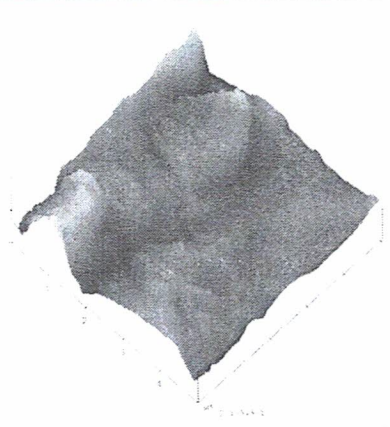
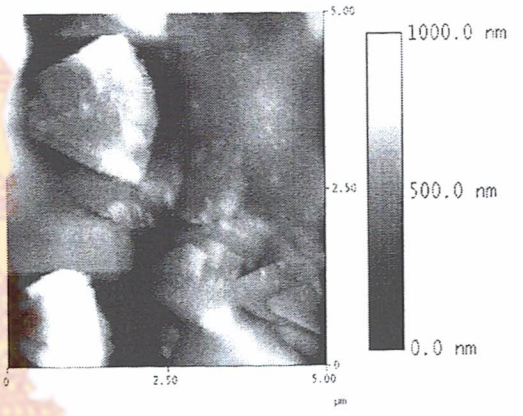
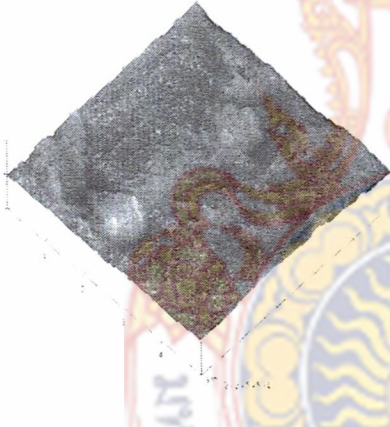
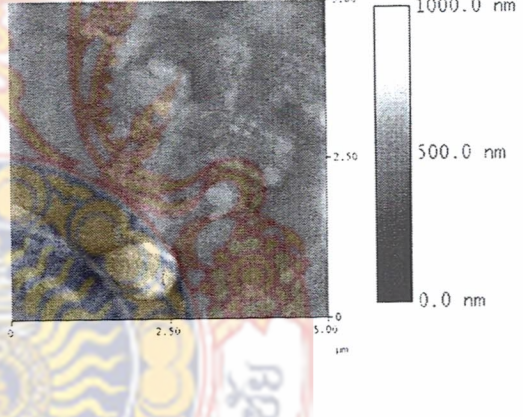
ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของถั้วไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่กำหนดในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ข.1 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

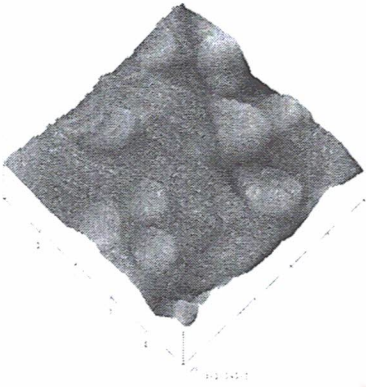
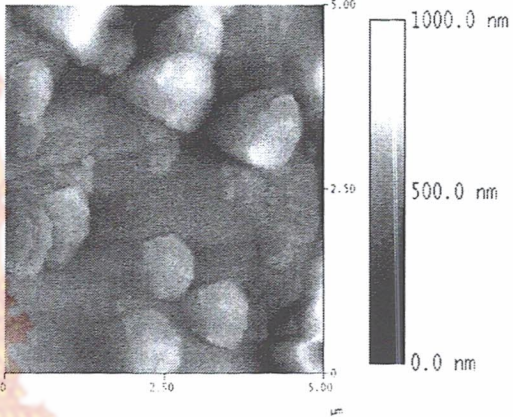
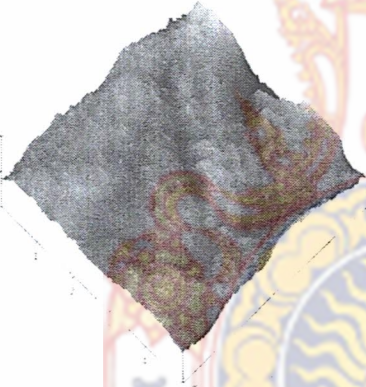
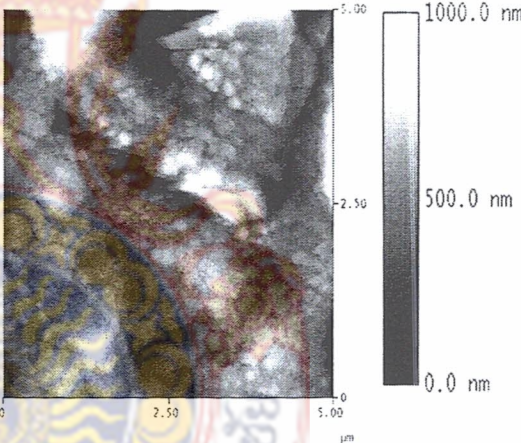
$\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ กับ KOH

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเถาไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ข.2 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ Na_2SiO_3 กับ NaOH

ตัวอย่าง	ลักษณะความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม	
	ภาพสามมิติ	ภาพด้านบน (Top view)
ก		
ข		

หมายเหตุ : ก คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตจากการสังเคราะห์ของเค้าไม้ยางพารา

ข คือ แผ่นสแตนเลสเคลือบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

รูปที่ ข.3 แสดงภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ K_2PO_4 กับ KOH

ประวัติผู้เขียน

1. ชื่อ สกุล นายวิทยา ศิริคุณ

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2539

2. ชื่อ สกุล นายมาหามะสุโฮมี มะแซ

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

-โครงการทุนศึกษากันภูมิคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551-2552

-ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NANOTECH Center of Excellence at Prince of Songkla University) ประจำปี 2551-2552

-โครงการทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551

-ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนใต้ประจำปี 2552-2554

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO₂ films” *Advanced Materials Research* Vols. 148-149 (2011) pp 1473-1479.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Improvement of hydrophilic property of rubber dipping former surface with Ni/B/TiO₂ nano-composite film” *Applied Surface Science*, Vol 258, (2012), Issue 10, pp4436-4443.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Phatcharee Phoempoon, Surasit Rawangwong, and Witthaya Sririkun “Application of rubber wood ash for removal nickel and copper from aqueous solution” *Environment and Natural Resources J.* Vol 11, No.2, (2013) pp17-27.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Peerawas Kongsong, Pichaya Pitsuwan, Zuhaidee Seni, Withaya Sririkun and Julaluck Rodjananugoon “Comparative of paraffin and turpentine used in wax resist dyeing on batik fabric” *Journal of community development research* 6 (1) (2013) pp 31-41. (Thai)

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirach Taweepreeda, Fumio Saito and Pitchaya Pitsuwan “Influence of nitrogen doped TiO₂ nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface” *Key Engineering Materials* Vol. 608 (2014) pp 141-146.

Mahamasuhaimi Masae, Auttakorn Pradupjan, Anon Pisutthipongchoto, Lek Sikong and Peerawas Kongsong “The Efficiency of Synthesized Tungsten Oxide (WO₃) –Doped Titanium Dioxide (TiO₂) in Inhibition of Escherichia coli Growth and Prolonging of Fresh Vegetables and Fruits” *Science and Technology Journal* Vol. 22 (2014) pp 327-336. (Thai)

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Peerawas Kongsong, Patcharee Phoempoon and Pichaya Pitsuwan “Thermo-physical characterization of paraffin and beeswax on cotton fabric” *Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)* Vol. 19 No.4 (2014) pp 69-77.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Pichaya Pitsuwan, Chaturong Pholthawon and Niti Pawanwatcharakorn “Synthesis of Na doped TiO₂ nano

photocatalysts film on its photoactivity and hydrophilicity” *Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)* Vol. 20 No.2 (2015) pp 63-71.

Mahamasuhaimi Masae, Pichaya Pitsuwan, Lek Sikong , Peerawas Kongsong, Arun Rattanapong, and Chainarong Jaidum “Low Temperature Preparation of Thiocarbamide Doped TiO₂ Film on Stainless Steel and its Antibacterial Efficiency Against *Staphylococcus aureus*.” *Applied Mechanics and Materials* Vol. 835 (2016) pp 78-83.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong , Kalayanee Kooptarnond, Parnumart Choopool, and Anurak Bonbang “Antibacterial activity and UV blocking of silk fabrics dyed with pericarp of *Garcinia Mangostana*” *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials* 2016, 46 (2),pp 152 -159.

M. MASAE, L. SIKONG, P. CHOOPOOL, P. PITSUWAN, W. SRIWITTAYAKUL, A. BONBANG, N. KIMTHONG “DYEING SILK FABRICS WITH STINK BEAN POD (*PARKIA SPECIOSA* HASSK.) NATURAL DYE IN THE COLOR FASTNESS AND UV PROTECTION” 12 (7) 2017.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Chaturong Pholthawon, Niti Pawanwatcharakorn, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah and Victor Sandu “Super hydrophilicity and photocatalytic activity of potassium doped TiO₂ nanoparticulate films” *Revista De Chimie* 67, no.9, 2016

Mahamasuhaimi Masae, Witthaya Sririkun and Ausmee Jeenarong “Antibacterial Activity of Se²⁺ Doped TiO₂ Nanoparticles Synthesized at Low Temperature” *CROATICA CHEMICA ACTA* (Article inpress, 2016)

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

Masae, M. Tonnyapas, D. Kooptarnond, K. “Development and investigation of granite waste tiles body incorporated with oil palm fiber ash” International Conference on Mining, Materials, and Petroleum Engineering: The Frontiers of Technology (ICFT-2007) Phuket, Thailand. 10-12 May 2007

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “The effect of B and Ni co-doped TiO₂ film coated on glass substrate” 4th International

conference on recent advances in materials minerals & environment and 2nd Asian symposium on materials & processing (RAMM&ASMP 2009) Penang, Malaysia. 1-3 June 2009

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “Influence of Ni doping on photoactivity and hydrophilicity of TiO₂ composite film” 10th International seminar on environment & architecture, and 1st international conference on engineering, environment, economic, safety & health (10th SENVAR& 1st CONVEESH 2009) Sulawesi Island, Indonesia. 26-27 October 2009

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO₂ films” 2010 International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010) Shenzhen, China. 6-8 November 2010

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Improvement of photoactivity and hydrophilicity of rubber latex formers by B and Ni co-doped TiO₂ films” Commission on Higher Education Congress IV: University Staff Development Consortium (CHE-USDC Congress IV) Pattaya, Thailand. 14-16 September 2011

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Influence of Ni/B/N/TiO₂ nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface” 2012 International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering, Materials and Energy (ICFMEME 2012) Beijing, China December 20-21 2012

Mahamasuhaimi Masae, Pichaya Pitsuwan, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Arun Rattanapong, and Chainarong Jaidum “Low Temperature Preparation of Thiocarbamide Doped TiO₂ Film on Stainless Steel and its Antibacterial Efficiency Against *Staphylococcus aureus*.” The 2016 3rd International Conference on Advanced Engineering and Technology (3rd ICAET) Incheon National University, South Korea, December 16-18, 2016.

สิทธิบัตรและอนุสิทธิบัตร ฯลฯ

๑. สิทธิบัตร เรื่อง สารเคลือบแม่พิมพ์ไทเทเนียมไดออกไซด์และกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้ โดย เล็ก สีกง กัลยาณี คุปตานนท์ มาหามะฮูไฮมี มะแซ และวิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1101000103 (18 มกราคม 2554)
๒. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม โดย เล็ก สีกง กัลยาณี คุปตานนท์ มาหามะฮูไฮมี มะแซ และ

วิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1103000475 (10 พฤษภาคม 2554) และได้รับอนุมัติการ
คุ้มครอง ตั้งแต่ 5 กันยายน 2554 ถึง 9 พฤษภาคม 2560

๓. อนุสิทธิบัตร เรื่อง เทียนไขเขียนผ้าบาติกและกรรมวิธีผลิตเทียนไขนี้ โดย มหาหะลุไฮมี
มะแซ เล็ก

สีคง พิรวัส คงสง ชูไฮดี สนิ จุพาลักษณ์ โรจนานุกูล และพิชญา พิศสุวรรณ เลขที่คำขอ
1303000461 (30 เมษายน 2556) และได้รับอนุมัติการคุ้มครอง ตั้งแต่ 3 มีนาคม 2557 ถึง
25 เมษายน 2562

๔. อนุสิทธิบัตร เรื่อง ตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักที่ได้จากเถ้าชีวมวลและกรรมวิธีผลิตตัว
ดูดซับนี้ โดย มหาหะลุไฮมี มะแซ เล็ก สีคง พิรวัส คงสง สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และวิทยา ศิ
ริคุณ เลขที่คำขอ 1303000462 (30 เมษายน 2556)

๕. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีในการผลิตแคลเซียมฟอสเฟตจากเถ้าไม้ยางพารา โดย มหา
หะลุไฮมี มะแซ เล็ก สีคง พิรวัส คงสง พชรวิทย์ วรรณลอและ ศรายุทธ สุขเพียร เลขที่คำ
ขอ 1403000145 (16 กุมภาพันธ์ 2557)

๖. อนุสิทธิบัตร เรื่อง สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไซด์เจือด้วยสารอินทรีย์เคลือบพลาสติก
และโลหะและกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้ โดย มหาหะลุไฮมี มะแซ เลขที่คำขอ
1403000894 (13 สิงหาคม 2557)

๗. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้ โดย มหาหะ
ลุไฮมี มะแซ เลขที่คำขอ 1503001761 (16 ตุลาคม 2558)

๘. อนุสิทธิบัตร เรื่อง फिल्मที่เปลี่ยนสีได้เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนที่ผลิตได้จากไม้ฝางและ
กรรมวิธีผลิตฟิล์มนี้ โดย มหาหะลุไฮมี มะแซ เลขที่คำขอ 1603000587 (8 เมษายน
2559)

รางวัลผลงานวิจัยที่ได้รับ

๑. โครงการเรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับ
ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม ได้รับรางวัล Special Prize ด้านเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม ในงานวันนัก
ประดิษฐ์ 2556 เมื่อวันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2556 จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
(วช) ณ อิมแพค เมืองทองธานี

๒. รางวัลวิทยานิพนธ์ระดับดีมาก ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๓. รางวัลวิทยานิพนธ์ชมเชย ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก กลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันนักวิจัยและนวัตกรรม ม.อ. ครั้งที่ 7 ประจำปี 2556

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. โครงการวิจัย: การพัฒนาคุณภาพการผลิตผ้าบาติกตามภูมิปัญญาท้องถิ่นในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
2. โครงการเรื่อง แบบขึ้นรูปถุงมือยางและถุงยางอนามัยที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ใต้อุปกรณ์โรตารี่และชุดแอคทีฟไลน์ที่ทำความสะอาดตัวเองได้, หัวหน้าโครงการ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่ได้รับ 350,000, เสร็จสิ้นโครงการ
3. โครงการวิจัย: การพัฒนาคุณภาพการย้อมสีผ้าไหมพรมเรียงจากสีธรรมชาติตามภูมิปัญญาท้องถิ่นในพื้นที่ภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2558, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 350,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
4. โครงการวิจัย: การต้านการยับ การยับยั้งจุลินทรีย์และต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายที่ย้อมจากวัสดุเศษเหลือของพืชตามภูมิปัญญาท้องถิ่นภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2559, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 200,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
5. โครงการวิจัย: การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายย้อมจากสีธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, งบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี 2559, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 268,300 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
6. โครงการวิจัย: การประยุกต์ใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับปฏิกิริยาและเปลือกมังคุดเพื่อเป็นวัสดุผสมผสาน, หัวหน้าโครงการ, งบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี 2560, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, กำลังดำเนินการ