

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต

ในบทนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ผิวเคลือบที่เตรียมด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ โดยผิวเคลือบที่ศึกษาประกอบด้วย (1) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (2) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อคาร์บอน และ (3) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ผิวเคลือบทั้งสามถูกศึกษาในแง่โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางกายภาพ ค่าความแข็ง ความต้านทานการขีดขูด และการสึกหรอแบบไถล โดยได้ผลการทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ

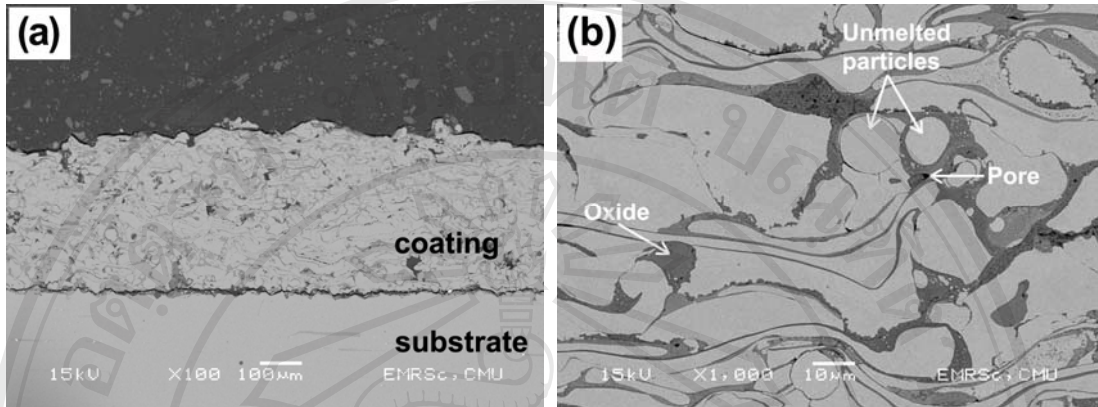
##### 1) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์

ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยอาศัยหลักการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (BSE-SEM) ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่เตรียมได้มีความหนาในช่วง 350–450 ไมครอน แสดงดังรูป 5.1(a) เมื่อศึกษาโครงสร้างของผิวเคลือบด้วยกำลังขยายสูงขึ้น พบว่าภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบที่เกิดขึ้นมีความเข้ม (contrast) แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งบอกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบที่แตกต่างกัน โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อ

5.2 จากรูป 5.1(b) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของผิวเคลือบมีลักษณะเป็นแผ่นๆ ของอนุภาคแผ่ (splats) ซ้อนทับกันเป็นชั้น (lamellar) โดยลักษณะเช่นนี้เกิดจากการที่อนุภาคพองหรือกึ่ง

พองเกิดการแผ่ตัวเมื่อถูกยึดกระทบซ้ำสเตรท ภายในผิวเคลือบพบรูพรุนขนาดเล็ก (บริเวณสีดำ) กระจายอยู่ทั่วผิวเคลือบ ส่วนอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลม คือ อนุภาคที่ไม่พองหรือพองไม่สมบูรณ์เมื่อตกกระทบซ้ำสเตรท ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการพ่นแบบเปลวไฟมีอุณหภูมิและความเร็วของอนุภาคพ่นเคลือบต่ำ (มีความเร็วประมาณ 60–130 เมตร/วินาที) [1] หรือ อนุภาคมีขนาดใหญ่เกินไปจนเกิดการพองเฉพาะบริเวณผิวของอนุภาค หรือ เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กลอยไปติดยังซ้ำสเตรทโดยยังไม่ถูกพองอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ในบริเวณแนวขอบของรอยต่อระหว่าง

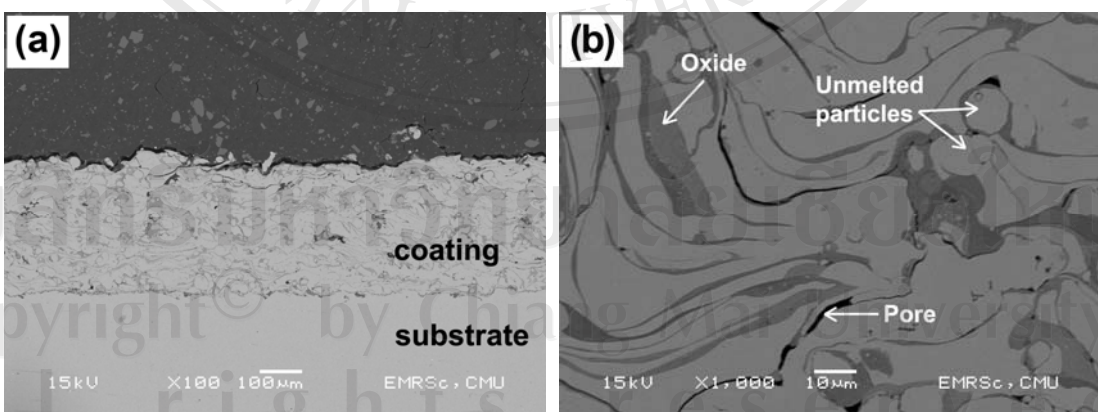
อนุภาคแฟมีชั่นออกไซด์ (บริเวณสีเทาเข้ม) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างทำการพ่นเคลือบ



รูป 5.1 ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า

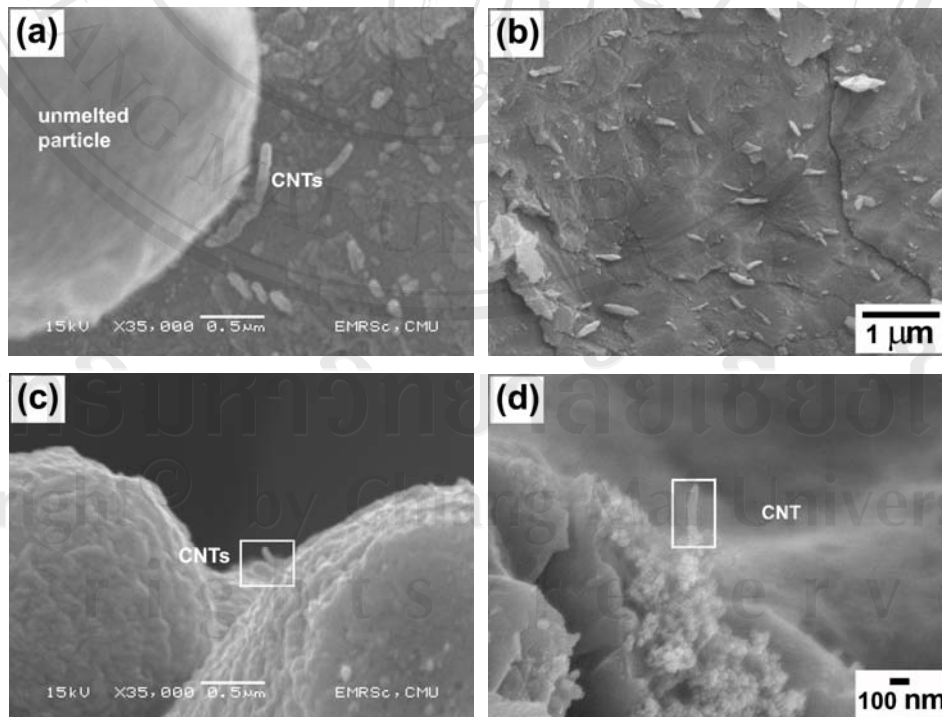
## 2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน

ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสามารถยึดติดกับซับสเตรทได้ดี จากรูป 5.2(a) ผิวเคลือบมีค่าความหนาอยู่ในช่วง 300–400 ไมครอน ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคโดยทั่วไปของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนคล้ายกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ กล่าวคือ ผิวเคลือบมีรูพรุนและชั้นออกไซด์กระจายอยู่ทั่วไปภายใน แสดงดังรูป 5.2(b)



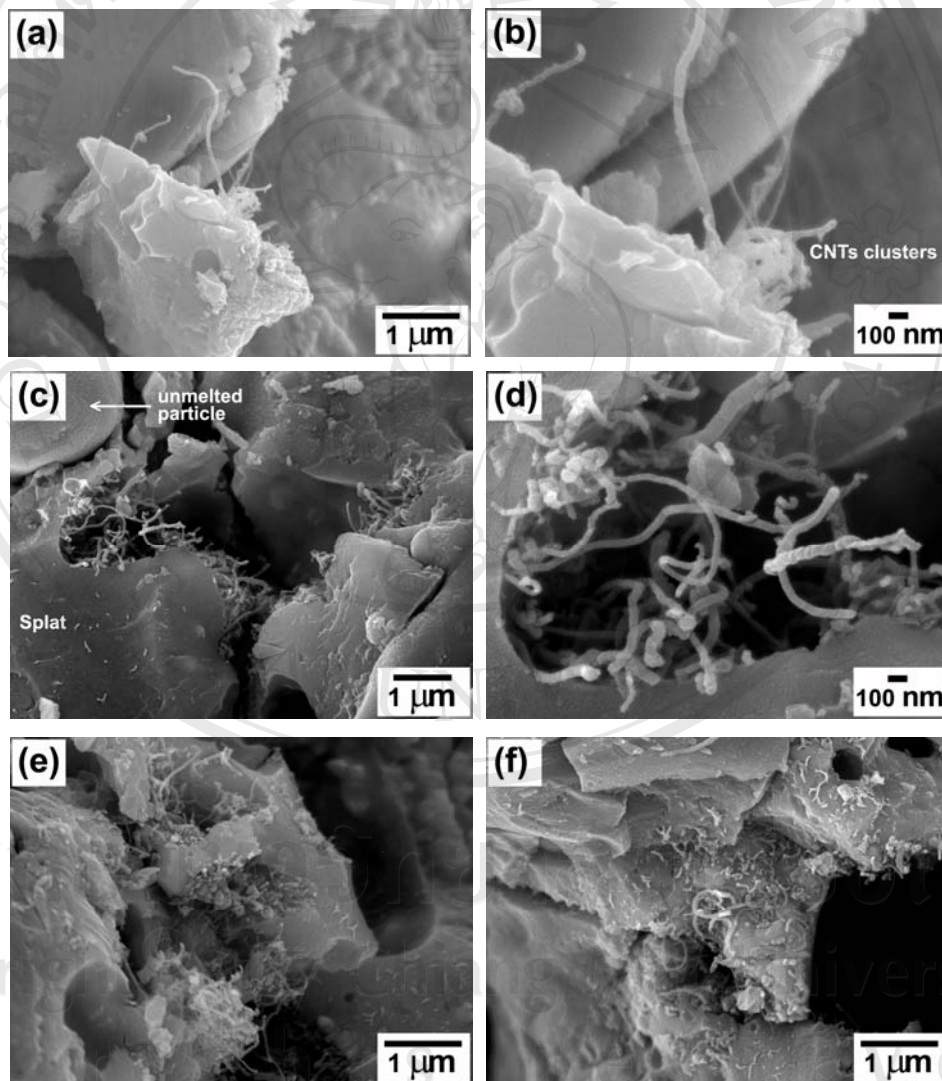
รูป 5.2 ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า

เมื่อศึกษารอยหักของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อานาโนคาร์บอน พบว่า มีลักษณะเส้นที่มีโครงสร้างขนาดนาโนเมตรปะปนอยู่ด้วย เมื่อศึกษาโครงสร้างนาโนเหล่านี้ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์สามารถยืนยันได้ว่าเส้นนาโนที่เกิดขึ้นเป็นท่อานาโนคาร์บอน ซึ่งผลการวิเคราะห์จะกล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2 จากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบเหล่านี้จึงเป็นการยืนยันว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อานาโนคาร์บอน ยังคงมีท่อานาโนคาร์บอนปรากฏอยู่ภายในผิวเคลือบหลังผ่านการพ่นเคลือบด้วยความร้อน ซึ่งลักษณะของท่อานาโนคาร์บอนมีทั้งแบบที่อยู่เป็นเส้นเดี่ยวๆ โดยมีความยาวของท่อานาโนคาร์บอนน้อยกว่า 1 ไมครอน ดังรูป 5.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความยาวน้อยกว่าท่อานาโนคาร์บอนก่อนนำมาพ่นเคลือบมาก (รูป 4.8–4.9) คาดว่าสาเหตุที่ทำให้ท่อานาโนคาร์บอนมีความยาวสั้นลงมากน่าจะเนื่องมาจากเกิดการสลายตัวไปบางส่วนเนื่องจากอุณหภูมิพ่นที่ค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 2000–3000 องศาเซลเซียส [1] ท่อานาโนคาร์บอนที่ยังคงอยู่ในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อานาโนคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวของอนุภาคแม่ โดยท่อานาโนคาร์บอนเป็นเส้นสั้นๆ หลายเส้นอยู่บริเวณใกล้เคียงกัน ดังรูป 5.3(a) และ 5.3(b) นอกจากนี้ยังอยู่แบบเส้นเดี่ยวๆ งอกอยู่บนอนุภาคที่ไม่หลอม ดังรูป 5.3(c) หรือ เป็นแบบเส้นเดี่ยวๆ อยู่บนอนุภาคแม่ ดังรูป 5.3(d)



รูป 5.3 รอยหักของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อานาโนคาร์บอนที่พบท่อานาโนคาร์บอนอยู่แบบเดี่ยว

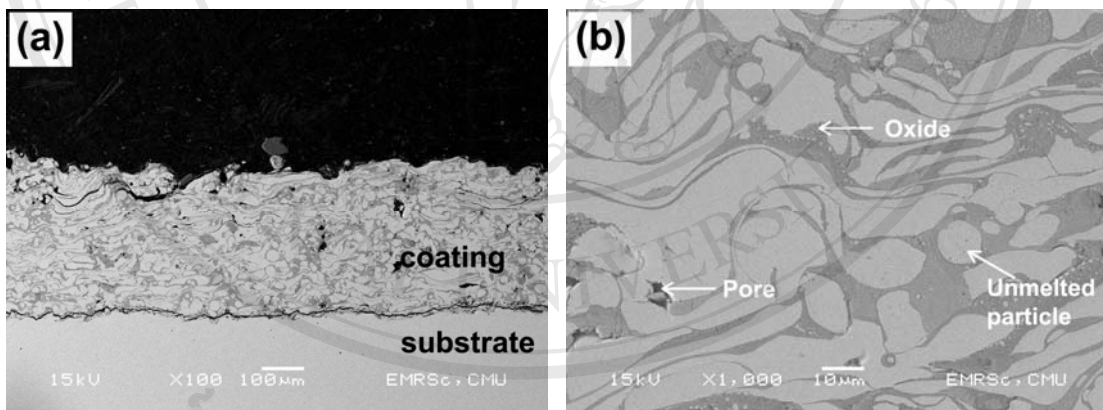
นอกจากนี้จากผลการศึกษารอยหัก พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนที่ยังคงอยู่ภายในผิวเคลือบแบบรวมกันเป็นกลุ่ม (agglomerate) ดังรูป 5.4 ซึ่งมีทั้งท่อนาโนคาร์บอนที่อยู่กันเป็นกลุ่มเล็กๆ ดังรูป 5.4(a) และกลุ่มใหญ่ ดังรูป 5.4(c, e, f) โดยความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่คงอยู่ในผิวเคลือบมีความยาวใกล้เคียงกับท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบอยู่บนผิวของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำมาเตรียมเป็นผิวเคลือบ กล่าวคือ มีความยาวมากกว่า 1 ไมครอน โดยท่อนาโนคาร์บอนที่พบในผิวเคลือบส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างอนุภาคแผ่นและรูพรุนภายในผิวเคลือบ



รูป 5.4 ภาพ SE-SEM รอยหักของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่พบท่อนาโนคาร์บอนอยู่แบบรวมกลุ่มกัน เมื่อ (a), (c), (e) และ (e) ที่กำลังขยายต่ำ และภาพ (b) และ (d) ภาพกำลังขยายสูงของ (a) และ (c) ตามลำดับ

### 3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ พบว่าผิวเคลือบมีความหนาอยู่ในช่วง 300–400 ไมครอน ส่วนประกอบของผิวเคลือบก็เช่นเดียวกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน กล่าวคือ ประกอบด้วยอนุภาคที่หลอมและหลอมไม่สมบูรณ์ ชั้นออกไซด์ และรูพรุน แต่สิ่งที่ต่างจากผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน คือ ปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากรูป 5.5(b) จะสังเกตเห็นได้ว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ มีปริมาณของชั้นออกไซด์มากกว่าในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (รูป 5.1(b)) และเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน (รูป 5.2(b)) ค่อนข้างมาก และชั้นออกไซด์ที่อยู่ระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาคจะค่อนข้างหนาที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเนื่องจากผิวเคลือบที่เตรียมด้วยการพ่นเคลือบด้วยความร้อนประกอบด้วยชั้นของออกไซด์อยู่แล้ว ผสมกับเส้นนาโนวิสเกอร์ที่เป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) เช่นกัน จึงคาดว่าน่าจะปะปนอยู่กับออกไซด์ที่เกิดจากการพ่นเคลือบด้วยความร้อนและแทรกอยู่ตรงบริเวณรอยต่อของชั้นอนุภาคแผ่ได้เป็นอย่างดี



รูป 5.5 ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า

## 5.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ

องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ถูกศึกษาด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ มีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

### 5.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

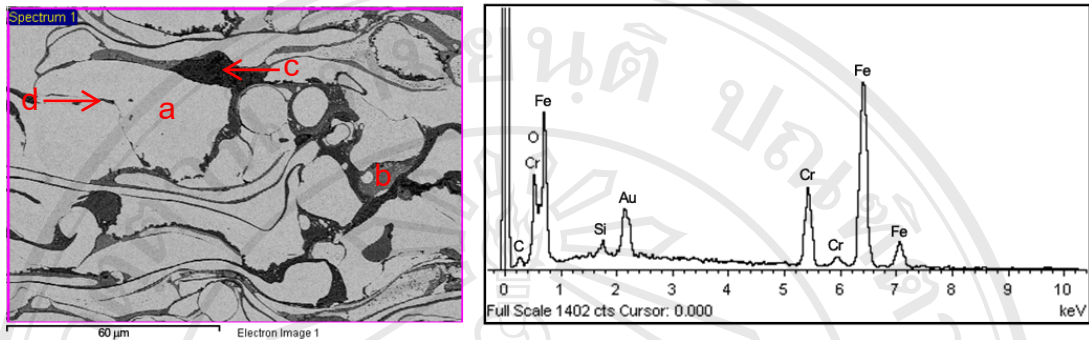
#### 1) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์

เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ ดังรูป 5.6 พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ประกอบด้วยธาตุ เหล็ก โครเมียม ออกซิเจน คาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุที่พบในผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์อยู่แล้ว

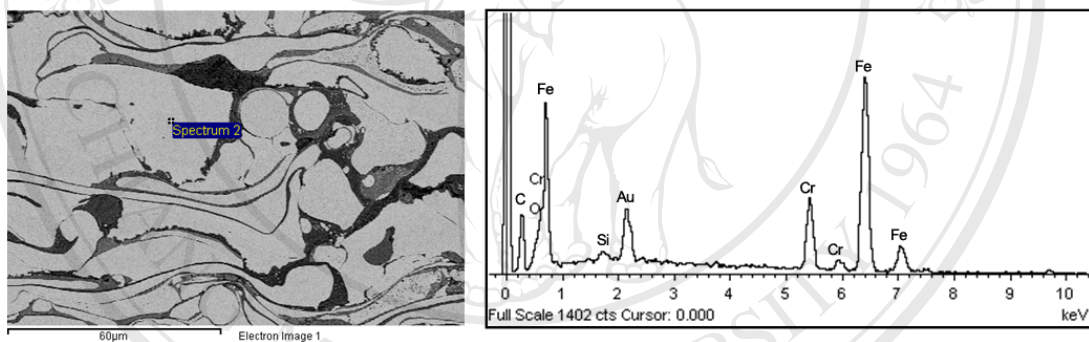
จากภาพถ่าย BSE-SEM พบว่าสีของโครงสร้างภายในผิวเคลือบมีความเข้มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งความแตกต่างนี้บ่งบอกความแตกต่างของเฟสที่เกิดขึ้นภายในผิวเคลือบ โดยบริเวณที่มีความสว่างของภาพมากสามารถคาดการณ์ได้ว่าเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมมาก และในทางตรงกันข้ามบริเวณที่มีความเข้มของภาพมาก (บริเวณสีดำ) จะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์พบเฟสที่ต่างกัน 4 บริเวณ คือ บริเวณ a (สีเทาอ่อน) บริเวณ b (สีเทาปานกลาง) บริเวณ c (สีเทาเข้ม) และบริเวณ d (บริเวณสีดำ)

เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบจุดที่บริเวณ a แสดงดังรูป 5.7 พบว่า ธาตุที่พบในบริเวณนี้ประกอบด้วยเหล็กในปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์บอน โครเมียม และออกซิเจน ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถคาดการณ์ได้ว่าบริเวณ a เป็นบริเวณของอนุภาคแม่เนื่องจากบริเวณนี้มีปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ตรวจพบมีค่าใกล้เคียงกับผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ก่อนการเตรียมผิวเคลือบ ดังนำเสนอในตาราง 5.1 บริเวณ b และบริเวณ c คาดว่าเป็นบริเวณของชั้นออกไซด์ของสารประกอบ 2 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) จากหลักการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนทำให้สามารถคาดได้ว่าบริเวณ b (สีเทาปานกลาง) เป็นเหล็กออกไซด์ เนื่องจากเหล็กออกไซด์มีเลขอะตอมเท่ากับ 160 ซึ่งมากกว่าเลขอะตอมของโครเมียม (152) เพราะฉะนั้นเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบริเวณ b จึงเกิดการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนได้มากกว่า ภาพ BSE-SEM ที่เกิดขึ้นจึงสว่างกว่าด้วย ดังนั้น

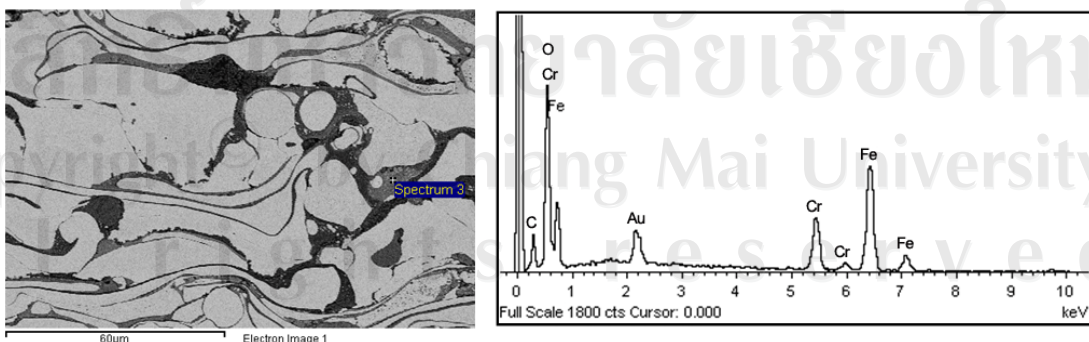
บริเวณ c จึงน่าจะเป็นสารประกอบโครเมียมออกไซด์ แสดงดังรูป 5.9 ส่วนบริเวณสีดำเป็นรูพรุนที่ปรากฏภายในผิวเคลือบ



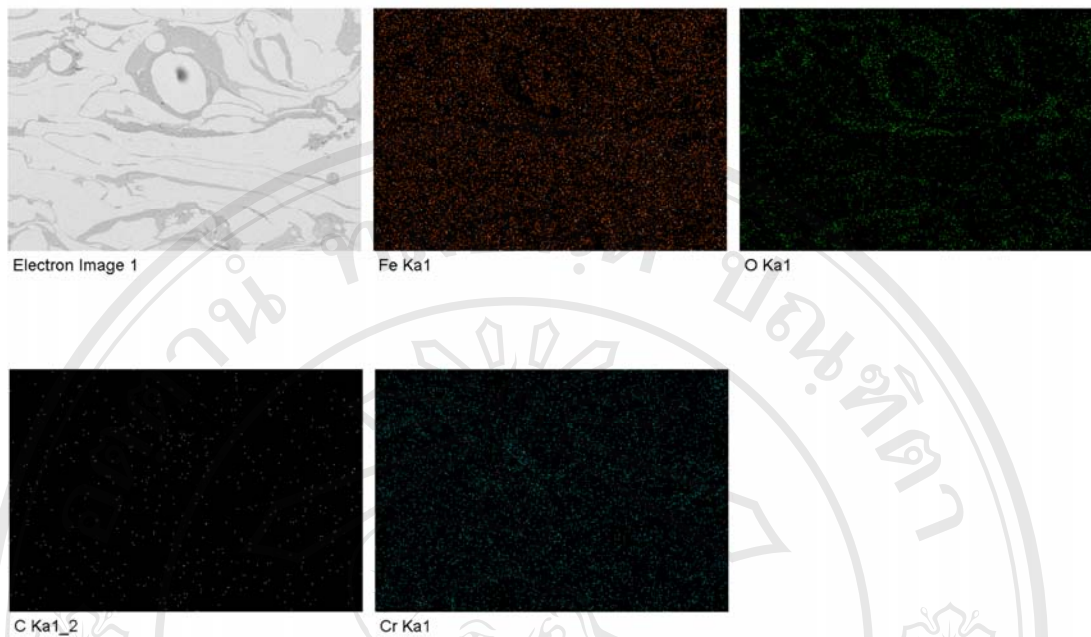
รูป 5.6 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่



รูป 5.7 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.8 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.9 ภาพถ่าย BSE-SEM ของขั้วเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และการวิเคราะห์แบบแผนที่

ตาราง 5.1 องค์ประกอบทางเคมีของขั้วเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

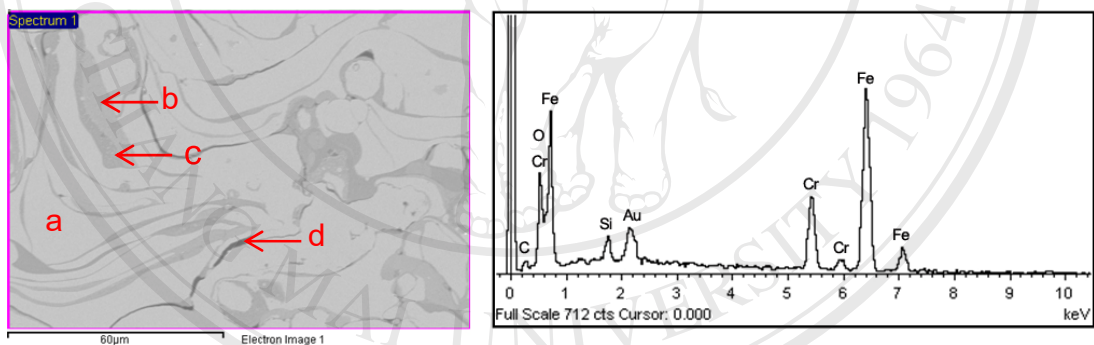
Element	Wt%			At%		
	Area	Point 1	Point 2	Area	Point 1	Point 2
Fe	74.29	71.31	53.52	58.35	46.65	27.98
C	2.53	13.77	10.41	9.25	41.89	25.31
Cr	16.41	14.31	15.12	13.85	10.05	8.49
O	6.77	0.62	20.95	18.55	1.41	38.22

หมายเหตุ: point 1 คือ บริเวณอนุภาคแม่

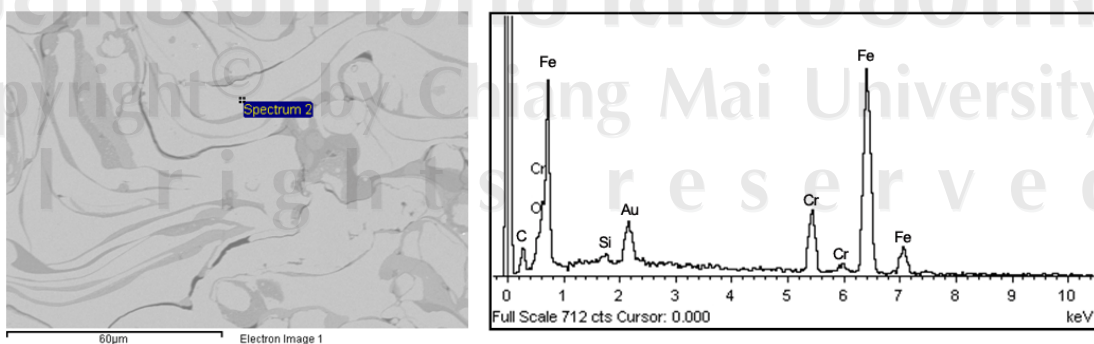
point 2 คือ บริเวณชั้นออกไซด์

## 2) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน

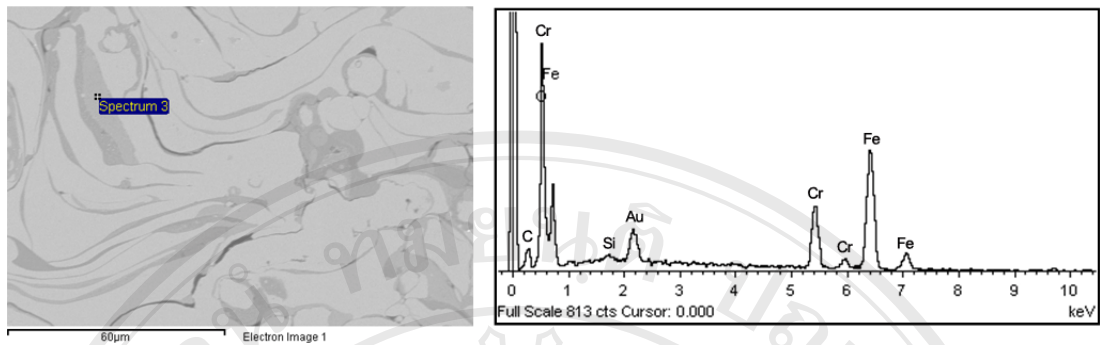
ผลการศึกษาร่วมกันของภาพทางเคมีภายในโครงสร้างของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ พบว่า ผิวเคลือบประกอบด้วยธาตุ เหล็ก โครเมียม ออกซิเจน คาร์บอน เป็นองค์ประกอบ ดังรูป 5.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ a และบริเวณ b ได้ผลการวิเคราะห์ที่เช่นเดียวกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ กล่าวคือ บริเวณ a เป็นบริเวณของอนุภาคแม่ และบริเวณ b เป็นบริเวณชั้นของเหล็กออกไซด์ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ พบว่า บริเวณ c เป็นบริเวณของโครเมียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนในผิวเคลือบที่ตรวจวิเคราะห์แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ มีปริมาณของการกระจายตัวมากกว่าในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ แสดงดังรูป 5.13 ซึ่งคาดว่าคาร์บอนที่กระจายตัวมากขึ้นภายในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่ปะปนอยู่ภายในผิวเคลือบนั่นเอง ดังผลโครงสร้างทางจุลภาคที่นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 5.1



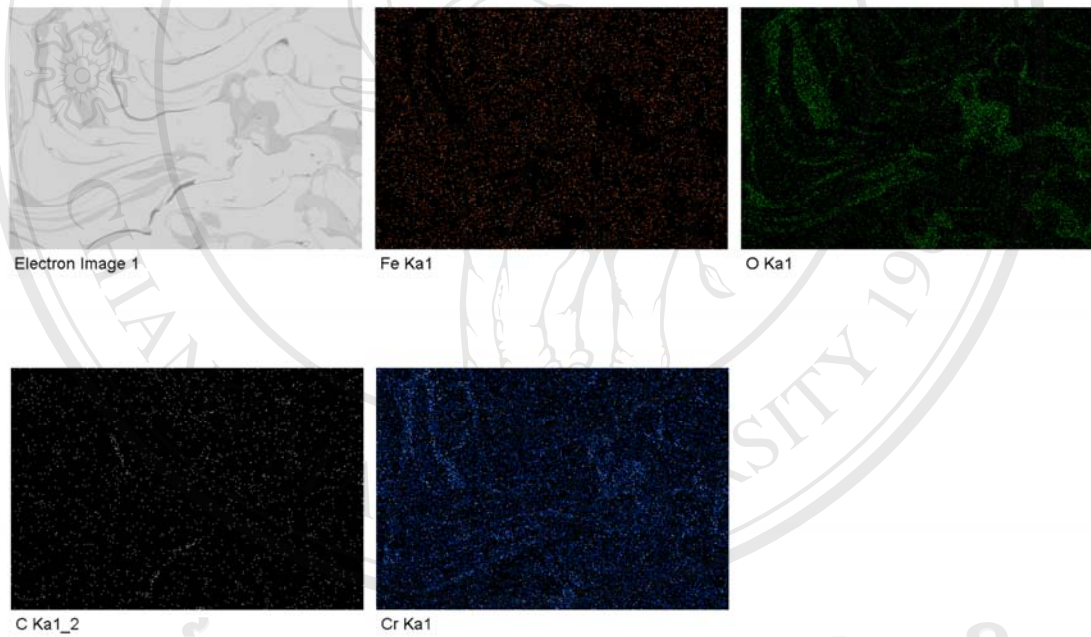
รูป 5.10 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่



รูป 5.11 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.12 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.13 ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์แบบแผนที่

ตาราง 5.2 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

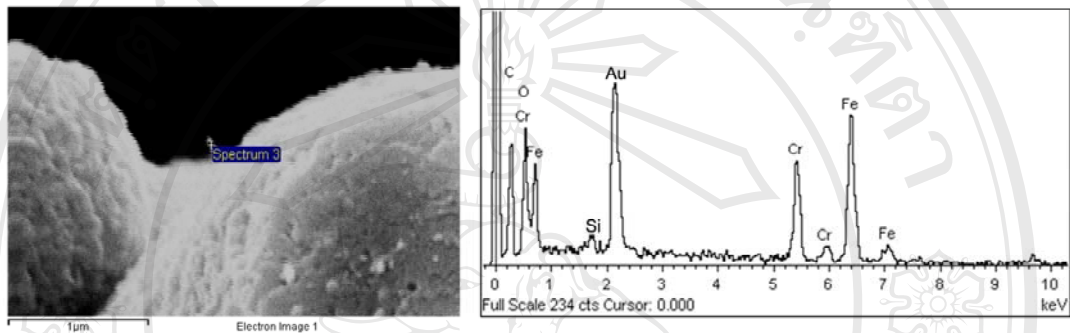
Element	Wt%			At%		
	Area	Point 1	Point 2	Area	Point 1	Point 2
Fe	71.92	78.55	56.41	54.73	60.84	32.24
C	2.72	6.62	5.68	9.62	23.85	15.09
Cr	17.25	13.23	16.64	17.25	11.00	10.21
O	8.11	1.59	21.28	8.11	4.31	42.46

หมายเหตุ: point 1 คือ บริเวณอนุภาคแม่

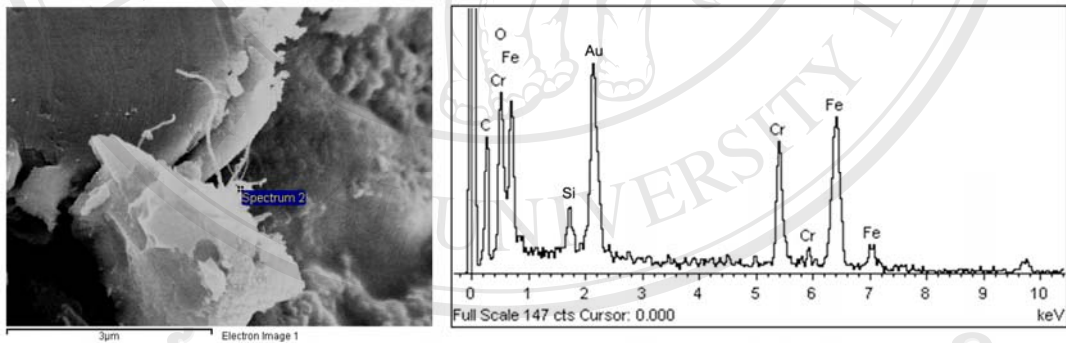
point 2 คือ บริเวณชั้นออกไซด์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

จากผลการศึกษารอยหักของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า โครงสร้างนาโนประกอบด้วยธาตุเหล็ก โครเมียม คาร์บอน และออกซิเจน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณของคาร์บอนระหว่างโครงสร้างนาโนทั้งแบบเส้นเดี่ยวๆ ดังรูป 5.14 และแบบกลุ่ม ดังรูป 5.15 ที่พบในผิวเคลือบจะเห็นได้ว่าปริมาณของคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่พบในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์



รูป 5.14 ภาพถ่าย SEM ของรอยหักผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



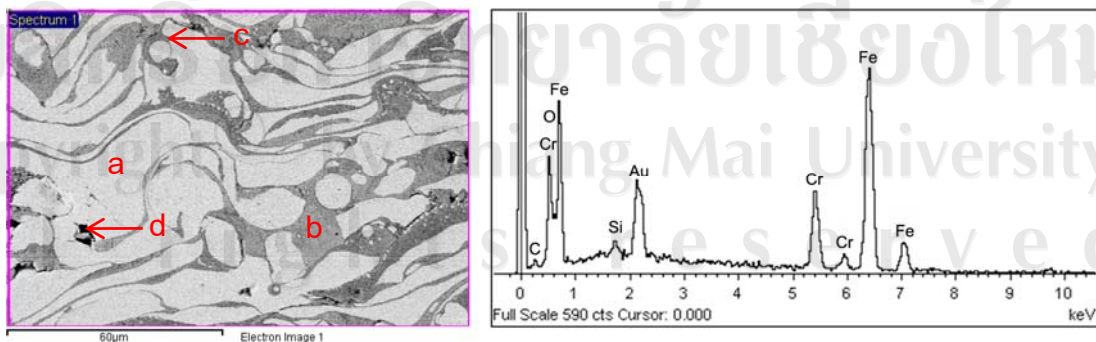
รูป 5.15 ภาพถ่าย SEM ของรอยหักผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด

ตาราง 5.3 องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนที่พบในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนานาคาร์บอนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

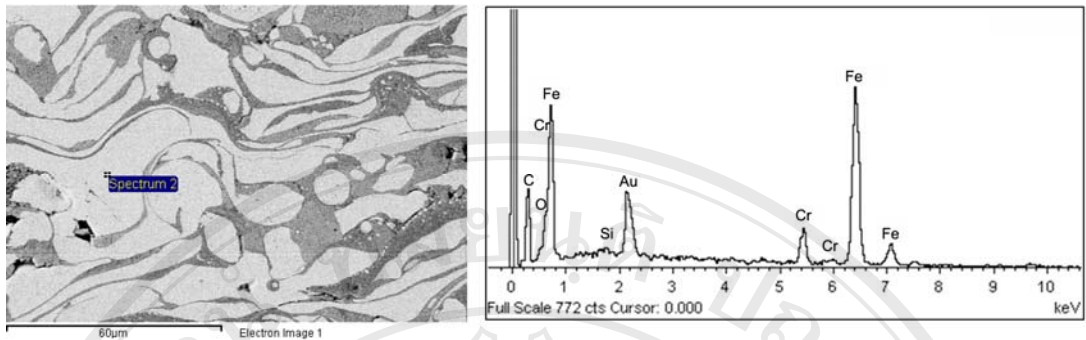
Element (Wt%)	Wt%		At%	
	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Fe	47.76	45.81	23.05	21.51
C	21.46	21.96	48.15	47.95
Cr	19.75	19.64	10.24	9.90
O	11.02	12.59	18.57	20.64

### 3) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์

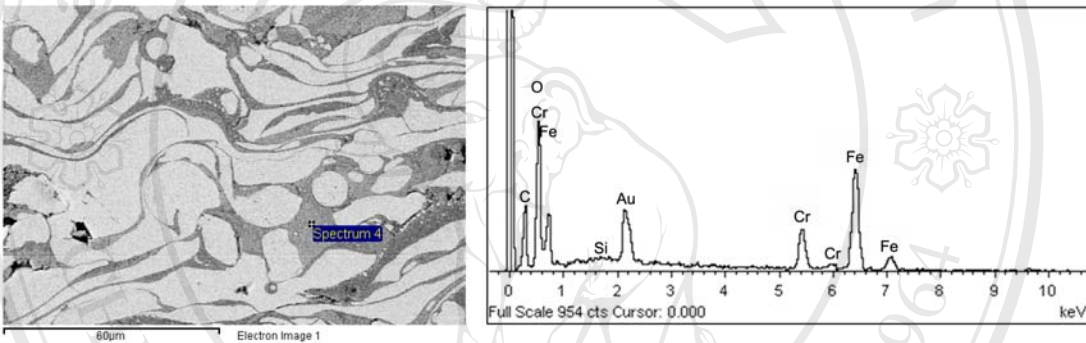
องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ซึ่งศึกษาด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ พบว่า ผิวเคลือบประกอบด้วยธาตุเหล็ก โครเมียม ออกซิเจน คาร์บอน เป็นองค์ประกอบดังรูป 5.16 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ a และ บริเวณ b ได้ผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนานาคาร์บอน กล่าวคือ บริเวณ a เป็นบริเวณของอนุภาคแม่ และบริเวณ b เป็นบริเวณของชั้นเหล็กออกไซด์ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ ดังรูป 5.19 พบว่า มีออกซิเจนกระจายตัวอยู่ทั่วไปในผิวเคลือบ ซึ่งสันนิษฐานว่า ออกซิเจนจากเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์สามารถกระจายตัวอยู่ในผิวเคลือบได้อย่างสม่ำเสมอ



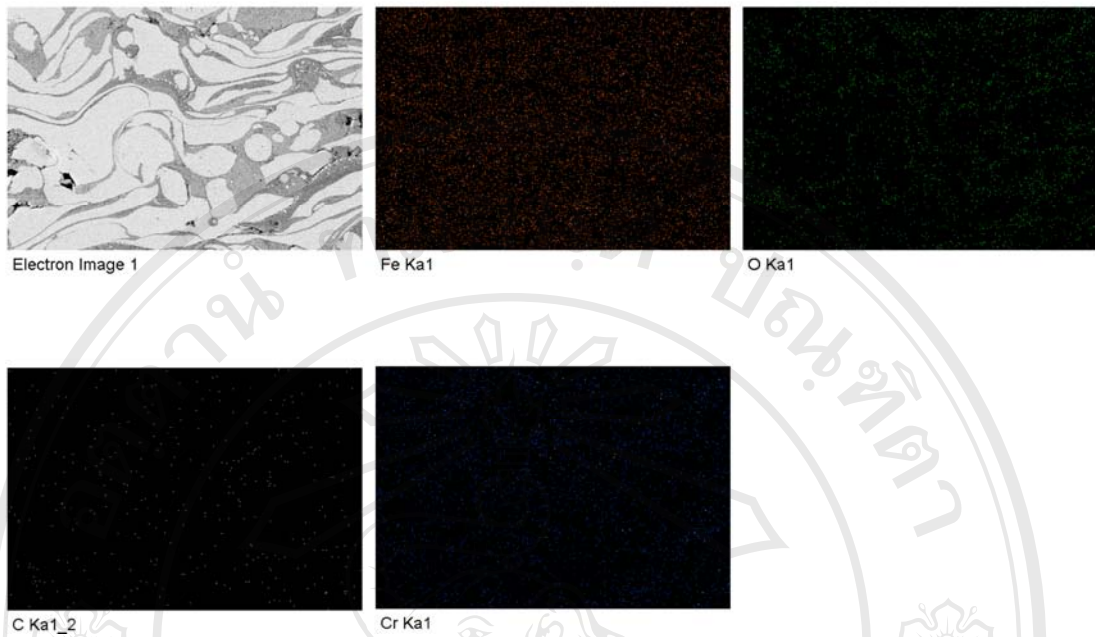
รูป 5.16 ภาพถ่าย BSE-SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่



รูป 5.17 ภาพถ่าย BSE-SEM ของฟิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนไวร์และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.18 ภาพถ่าย BSE-SEM ของฟิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนไวร์และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด



รูป 5.19 ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และการวิเคราะห์แบบแผนที่

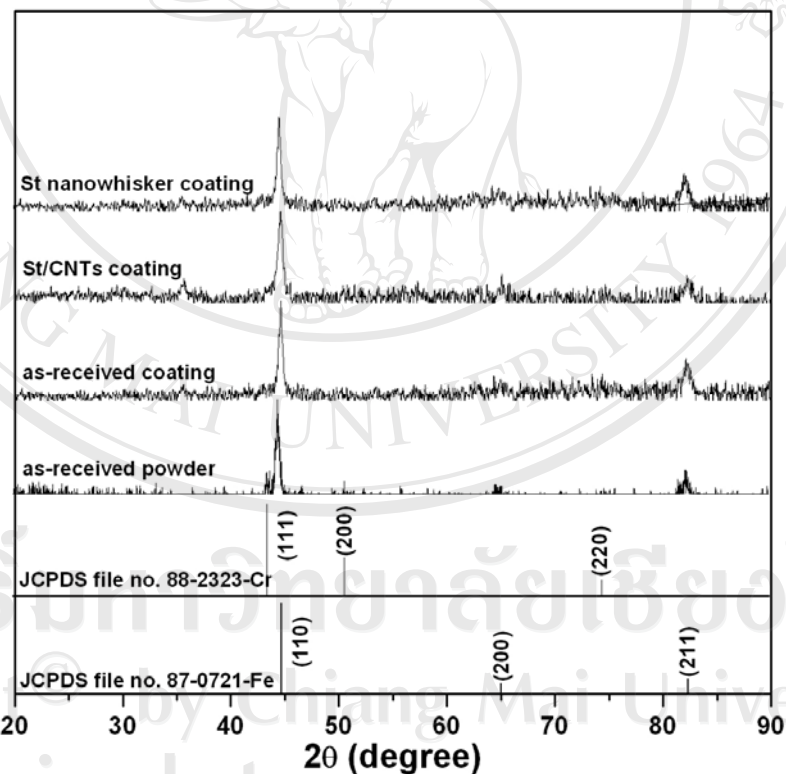
ตาราง 5.4 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

Element	Wt%			At%		
	Area	Point 1	Point 2	Area	Point 1	Point 2
Fe	74.69	72.00	51.95	57.53	41.69	24.60
C	2.19	19.13	16.91	7.84	51.51	37.21
Cr	14.80	7.95	11.61	12.24	4.94	5.90
O	8.32	0.92	19.54	22.38	1.86	32.29

หมายเหตุ: point 1 คือ บริเวณอนุภาคแม่  
point 2 คือ บริเวณชั้นออกไซด์

## 5.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ผลศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ทั้งผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ประกอบด้วยธาตุเหล็กเป็นหลักที่มีโครงสร้างอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) แสดงดังรูป 5.20 เปรียบเทียบจากสเปกตรัมมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 87-0721 โดยเฟสของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิดเหมือนกับผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ในกรณีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนตรวจสอบไม่พบเฟสของคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ประกอบด้วยเฟสของเหล็กเช่นเดียวกับผงเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ไม่ปรากฏเฟสของสารประกอบออกไซด์ดังที่พบในผง เนื่องจากปริมาณของออกไซด์ที่ปรากฏในผิวเคลือบยังมีน้อยเกินไป



รูป 5.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม (St powders) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม (St coating) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน (St/CNTs) และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ (St nanowhisker)

### 5.3 สมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต

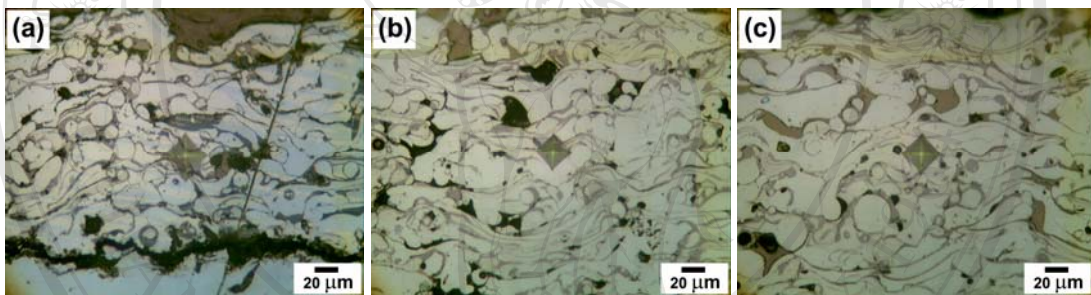
จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบที่เสริมแรงด้วยเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์ พบว่า ค่าความหยาบผิว (roughness) ของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 14 ไมครอน เมื่อวัดความหนาของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด พบว่า ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 300–400 ไมครอน จากการหาค่าร้อยละความพรุนและปริมาณของชั้นออกไซด์ของผิวเคลือบด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์มีค่าร้อยละความพรุนใกล้เคียงกันกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์มีปริมาณออกไซด์ใกล้เคียงกับของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน แต่น้อยกว่าที่พบในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ประมาณ 1 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นในส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการพ่นเคลือบผนวกกับสารประกอบของเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์ที่งอกออกมาจากผงเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะฉะนั้นจึงทำให้ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีปริมาณของชั้นออกไซด์มากกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ข้อมูลทางกายภาพของผิวเคลือบของ ความหยาบ ความหนา ร้อยละความพรุน และปริมาณของชั้นออกไซด์ แสดงในภาคผนวก ค-จ ตามลำดับ

ตาราง 5.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบ

Physical properties	Coatings		
	As-received	St /CNTs	St nanowhisker
Roughness ( $\mu\text{m}$ )	$14.40 \pm 1.16$	$14.12 \pm 1.02$	$14.02 \pm 1.34$
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	$414 \pm 42$	$395 \pm 50$	$401 \pm 60$
Porosity (%)	$2.23 \pm 0.80$	$1.95 \pm 0.81$	$2.06 \pm 0.85$
Oxide content (%)	$21.5 \pm 3.5$	$23.6 \pm 4.5$	$47.0 \pm 7.2$

#### 5.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งผิวเคลือบด้วยเทคนิคการกดแบบวิกเกอร์ส

การวิเคราะห์ความแข็งของผิวเคลือบโดยใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ส โดยใช้น้ำหนักกด 300 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที โดยศึกษาค่าความแข็งของผิวเคลือบทั้ง 3 คือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ผิวเคลือบที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนและผิวเคลือบที่เสริมแรงด้วยเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์ ได้ภาพถ่ายรอยกดของผิวเคลือบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ดังรูป 5.21 พบว่าโดยทั่วไปขนาดของรอยกดของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์มีความกว้างมากที่สุด รองลงมาคือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอน ตามลำดับ และเมื่อนำขนาดรอยกดไปคำนวณค่าความแข็งตามสมการ 2.2 ได้ค่าความแข็งดังแสดงในตาราง 5.6



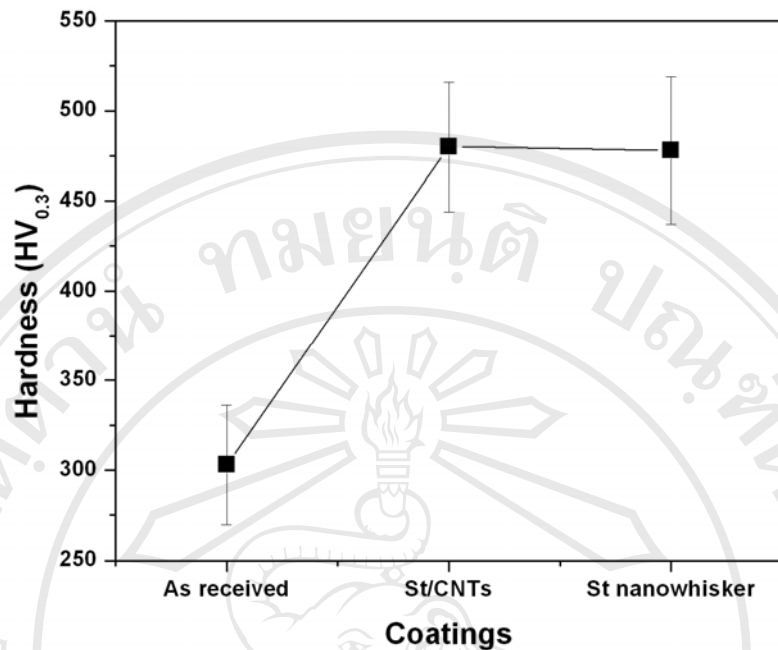
รูป 5.21 ภาพถ่ายรอยกดแบบวิกเกอร์สของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์

จากตาราง 5.6 พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตทั้ง 2 ชนิด คือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยสารประกอบของเหล็กออกไซด์มีความแข็งแบบวิกเกอร์สใกล้เคียงกัน และผิวเคลือบทั้ง 2 ชนิดมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สมากกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์สูงถึง 1.6 เท่า จากการผลการวิเคราะห์ความแข็งของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งสูงกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ส่วนหนึ่งอาจจะเป็นผลมาจากร้อยละความพรุนในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าน้อยที่สุด (1.95%) อย่างไรก็ตามปริมาณความพรุนของผิวเคลือบทั้งสามชนิดก็อาจจะกล่าวได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกันนัก ดังนั้น สาเหตุหลักที่

ทำให้ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าความแข็งมากกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีค่า Young's modulus ที่สูงถึงประมาณ 1 TPa [59] และท่อนาโนคาร์บอนที่กระจายตัวอยู่ยอมให้เกิดการยืดหยุ่น (elastic recovery) ของรอยกดจึงส่งผลให้ค่าความแข็งดีขึ้นตามไปด้วย [58, 59] นอกจากนี้ยังพบว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีค่าความแข็งมากกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์อีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผิวเคลือบชนิดนี้มีปริมาณของชั้นออกไซด์เป็นองค์ประกอบมากที่สุด ( $47.0 \pm 7.2\%$ ) โดยชั้นของออกไซด์นี้เกิดจากออกไซด์ที่เกิดจากการพ่นเคลือบและเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์จากผงพ่น ซึ่งชั้นของออกไซด์นี้จัดเป็นวัสดุประเภทเซรามิกซึ่งมีความแข็งสูง เพราะฉะนั้นจึงเป็นตัวช่วยเสริมทำให้ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีค่าความแข็งดีกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์

ตาราง 5.6 ค่าความแข็งแบบวิสเกอร์สของผิวเคลือบที่น้ำหนักกด 300 กรัม

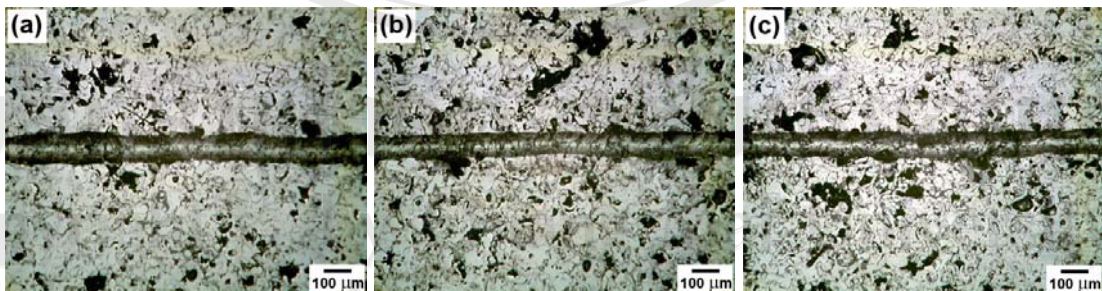
Coating	Hardness	
	(HV <sub>0.3</sub> )	(GPa)
As-received	303 ± 33	3.00 ± 0.32
St /CNTs	480 ± 36	4.74 ± 0.35
St nanowhisker	478 ± 41	4.72 ± 0.41



รูป 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของผิวเคลือบ

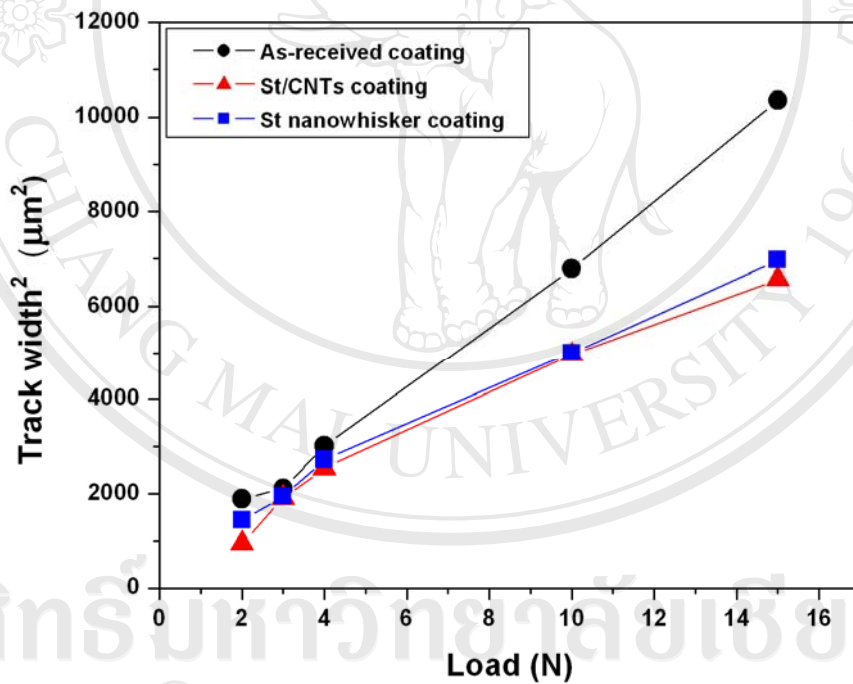
#### 5.5 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการขูดขีด

จากการศึกษาผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานการขูดขีด โดยใช้ น้ำหนักในการขูด พบว่า ผิวเคลือบ 2, 3, 10 และ 15 นิวตัน ซึ่งภายหลังจากทดสอบได้ถ่ายภาพ ลักษณะของรอยขีดด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงดังรูป 5.23 จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะรอยขีดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของผิวเคลือบจะเกิดการเพียงแปรรูปอย่างถาวร (plastic deformation) แต่ไม่มีการสูญเสียเนื้อของวัสดุเกิดขึ้นบริเวณขอบของการขูดขีด ซึ่งนับว่าเป็นการเสียหายแบบไม่รุนแรง



รูป 5.23 ตัวอย่างภาพถ่าย OM ของรอยขีดของผิวเคลือบ (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ โดยใช้ น้ำหนักทดสอบ 15 นิวตัน

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยขีดกำลังสองกับน้ำหนักที่ให้ ดังรูป 5.24 พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมมีความชันของกราฟมากที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีความกว้างของรอยขีดมากที่สุด ส่วนผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนและผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีความชันใกล้เคียงกัน จากการหาค่าความแข็งแบบขูดขีด (scratch hardness) ด้วยสมการ 2.4 (ข้อมูลในภาคผนวก ข) ได้ผลดังตาราง 5.7 ซึ่งพบว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน มีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ตามลำดับ คาดว่าสาเหตุที่ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดมากกว่าผิวเคลือบอีก 2 ชนิด มีเหตุผลเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบวิสเกอร์ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 5.5



รูป 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยขีดกำลังสองกับน้ำหนักที่ให้

ตาราง 5.7 ค่าความแข็งของผิวเคลือบที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด

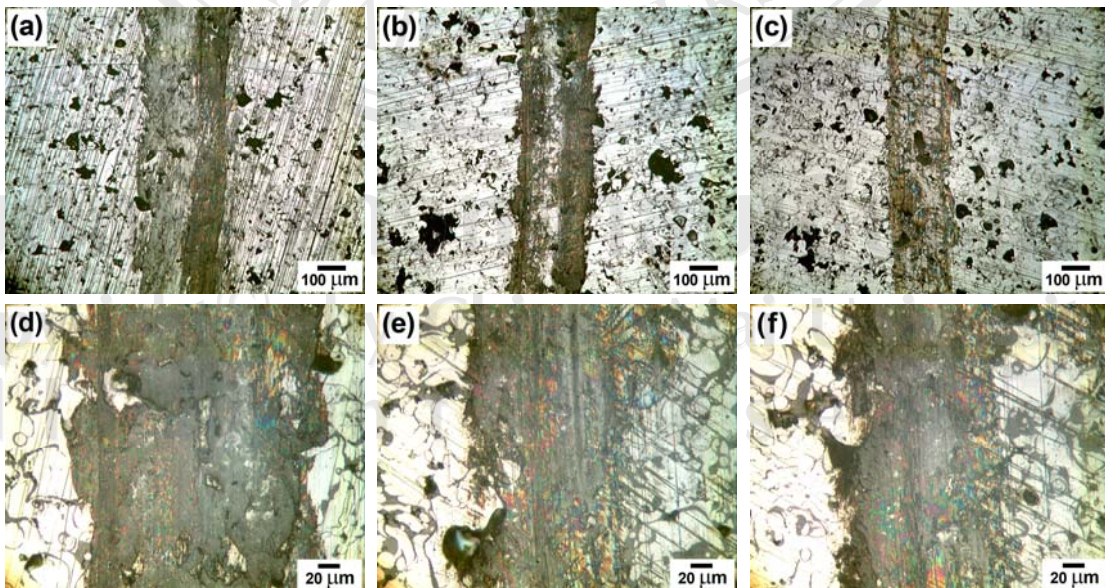
Coating	H <sub>s</sub> (GPa)
As-received	3.50 ± 0.58
St/CNTs	4.93 ± 0.64

St nanowhisker	$4.43 \pm 0.60$
----------------	-----------------

จากการศึกษาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส และความต้านทานต่อการขีดข่วนของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด ดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า ค่าความแข็งที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส ( $HV_{0.3}$ ) ดังตาราง 5.6 และค่าความแข็งจากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน ( $H_g$ ) ดังตาราง 5.7 ได้ค่าความแข็งที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ตามลำดับ

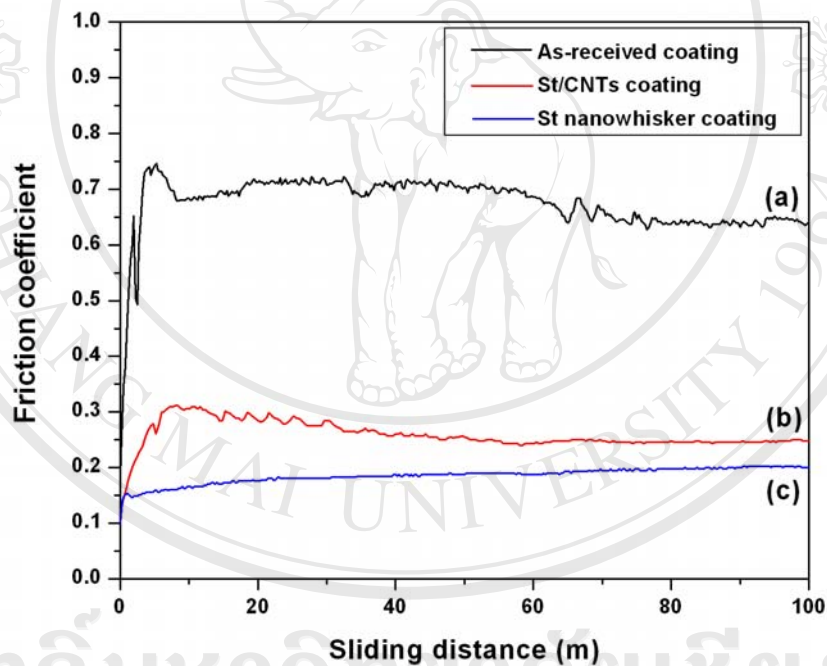
#### 5.6 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ

จากการทดสอบการสึกหรอแบบไถลด้วยเทคนิค pin-on-disk ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมและผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตที่น้ำหนัก 75, 150 และ 300 กรัม เป็นระยะทาง 50, 75, 100 และ 150 เมตร พบว่า ผิวเคลือบเกิดการรอยสึกขึ้น ดังรูป 5.26(a-c) และเมื่อถ่ายภาพที่กล้องขยายสูงขึ้นจะเห็นลักษณะการแปรรูปอย่างถาวรของรอยสึกอย่างชัดเจน ดังรูป 5.25(d-f)



รูป 5.25 รอยการสึกหรอของผิวเคลือบที่ระยะทดสอบ 75 เมตร โดยใช้น้ำหนัก 150 กรัม (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์, (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ (d)–(f) ภาพกำลังขยายสูงของ (a)–(c) ตามลำดับ

ผลการศึกษาลัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient) ของผิวเคลือบจากการทดสอบการสึกหรอแบบไถล ผลการศึกษาพบว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีลัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.15 รองลงมา คือ ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนและผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ โดยมีค่าลัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.25 และ 0.65 ตามลำดับ แสดงดังรูป 5.26



รูป 5.26 ลัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวเคลือบ (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่น้ำหนักทดสอบ 250 กรัม ที่ระยะทางทดสอบ 100 เมตร

จากการศึกษาอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบทั้ง 3 ชนิด จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่สูญเสียกับระยะทางทดสอบ ดังแสดงในภาคผนวก ฅ พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดที่ทุกๆ น้ำหนักทดสอบ แสดงใน

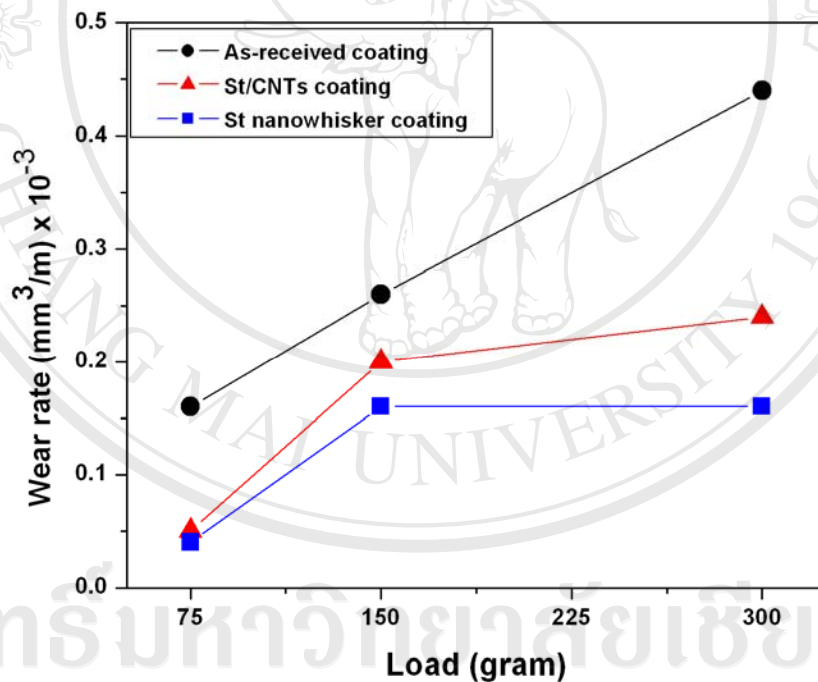
ตาราง 5.8 โดยที่น้ำหนักกด 75 กรัม มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ ถึง 4 เท่า แต่มีค่าอัตราการสึกหรอใกล้เคียงกับผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอน สำหรับน้ำหนักกด 150 กรัม อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ประมาณ 1.2 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ สำหรับน้ำหนักกด 250 กรัม ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอน และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ประมาณ 1.5 เท่า และ 2.7 เท่า ซึ่งค่าอัตราการสึกหรอ สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ ผิวเคลือบผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากที่สุดเพราะฉะนั้นจึงมีอัตราการสึกหรอมากที่สุดในขณะที่ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยที่สุด ดังนั้นจึงมีค่าอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดด้วย

ตาราง 5.8 อัตราการสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบ

Coatings	Wear rate (mm <sup>3</sup> /m)		
	75 g	150 g	250 g
As-received	$0.16 \times 10^{-3}$	$0.26 \times 10^{-3}$	$0.44 \times 10^{-3}$
Stainless steel/CNTs	$0.05 \times 10^{-3}$	$0.20 \times 10^{-3}$	$0.24 \times 10^{-3}$
Stainless steel nanowhisker	$0.04 \times 10^{-3}$	$0.16 \times 10^{-3}$	$0.16 \times 10^{-3}$

จากการผลการทดสอบการสึกหรอแบบไถล พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตทั้ง 2 ชนิด มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ เมื่อเพิ่มน้ำหนักในการทดสอบการสึกหรอแบบไถลมากขึ้น พบว่า จะไม่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตทั้งสองชนิดมากนัก หรือกล่าวได้ว่าอัตราการสึกหรอมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกเสริมแรงด้วยโครงสร้างขนาดนาโนแปรผันตรงกับน้ำหนักที่ใช้ทดสอบอย่างชัดเจน ดังรูป 5.27 ซึ่งคาดว่าสาเหตุที่ทำให้ผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกเสริมแรงด้วยโครงสร้างขนาดนาโน นั้นเป็นเพราะทั้งท่อนาโนคาร์บอนและเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์ช่วยปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ โดยท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (solid lubricant)

[60, 61] และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต 2 ชนิด พบว่า ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอน แม้ว่าผิวเคลือบทั้งสองมีค่าความแข็งใกล้เคียงกันก็ตามทั้งนี้อาจเป็นเพราะเหล็กออกไซด์นาโนวิสเกอร์สามารถกระจายตัวอยู่ในผิวเคลือบปะปนอยู่กับออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการพ่นเคลือบได้ดี ทำให้เฟสออกไซด์นี้มีความสม่ำเสมอสูง แตกต่างจากผิวเคลือบที่ถูกเสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่มีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนไม่ค่อยสม่ำเสมอ ดังที่ปรากฏในรูป 5.3 และ 5.4 ซึ่งความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของเฟสเสริมแรง นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ควบคุมอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ และที่สำคัญผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (0.25) สูงกว่าผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ (0.15) จึงส่งผลให้อัตราการสึกหรอมากกว่าด้วย



รูป 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอแบบ ไกลกับน้ำหนักกดของผิวเคลือบ