

บทที่ 4

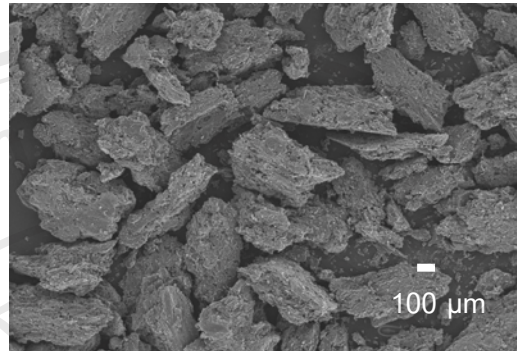
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ได้แสดงผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโน และเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ อีกทั้งยังศึกษาลักษณะดังกล่าวในผงเคลือบ และผิวเคลือบที่เตรียมได้จากการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ ตลอดจนการทดสอบสมบัติต่างๆของผิวเคลือบ ดังรายละเอียดของการศึกษาและผลการทดสอบดังนี้

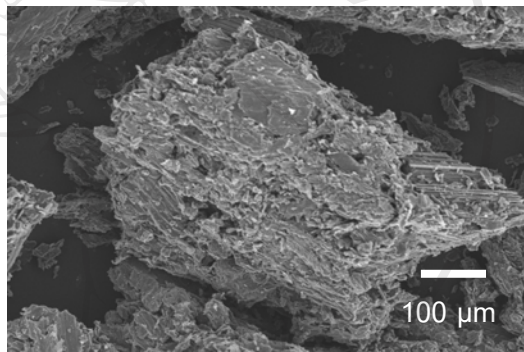
4.1 โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นและเส้นใยนาโน

4.1.1 โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

การสังเคราะห์เส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-C-Al}_2\text{SiC}_4$ โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจากไส้ดินแกรไฟต์สอเบอร์ EE ยี่ห้อ STAEDTLER ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผงไส้ดินสอด้วยเทคนิค SEM พบว่าผงจะเป็นก้อนที่เป็นเหลี่ยมเป็นมุมที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นแกรไฟต์ ดังแสดงในรูป 4.1 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในสารตั้งต้นโดยใช้เทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ พบว่ามีธาตุองค์ประกอบสำคัญ คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิคอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และไททาเนียม (Ti) ดังรูป 4.2 และตาราง 4.1 สำหรับธาตุ O ที่ตรวจพบในไส้ดินสอในปริมาณมากถึงร้อยละ 36 คาดว่าส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ไส้ดินสอมีผงแกรไฟต์เป็นองค์ประกอบทำให้เกิดการดูดซับความชื้นในอากาศได้ดี หลังจากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบในรูปสารประกอบด้วยเทคนิค XRD พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนนี้สอดคล้องกับ JCPDS ไฟล์หมายเลขดังต่อไปนี้ 82-0512 (ภาคผนวก ง รูป ง.2) สารประกอบ SiO_2 มีโครงสร้างผลึกในระบบเตตระโกนัล (tetragonal) 25-0284 (ภาคผนวก ง รูป ง.3) C ในรูปของแกรไฟต์มีโครงสร้างผลึกในระบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) และ 43-1484 (ภาคผนวก ง รูป ง.1) Al_2O_3 มีโครงสร้างผลึกในระบบลูกบาศก์ (cubic) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นแสดงในตาราง 4.1 และวิเคราะห์องค์ประกอบในรูปสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ดังรูป 4.3

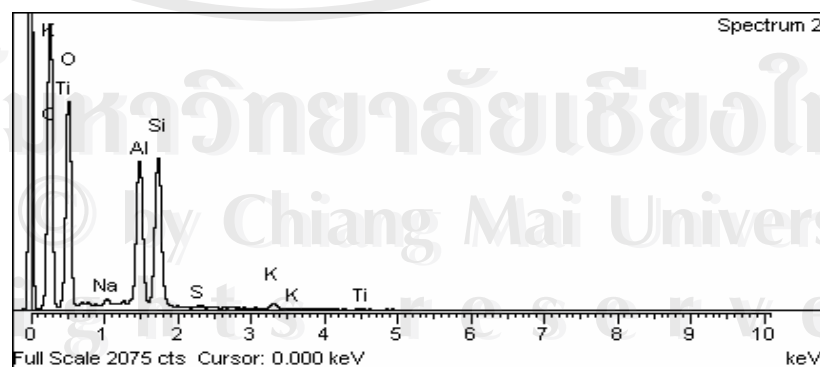


(ก)



(ข)

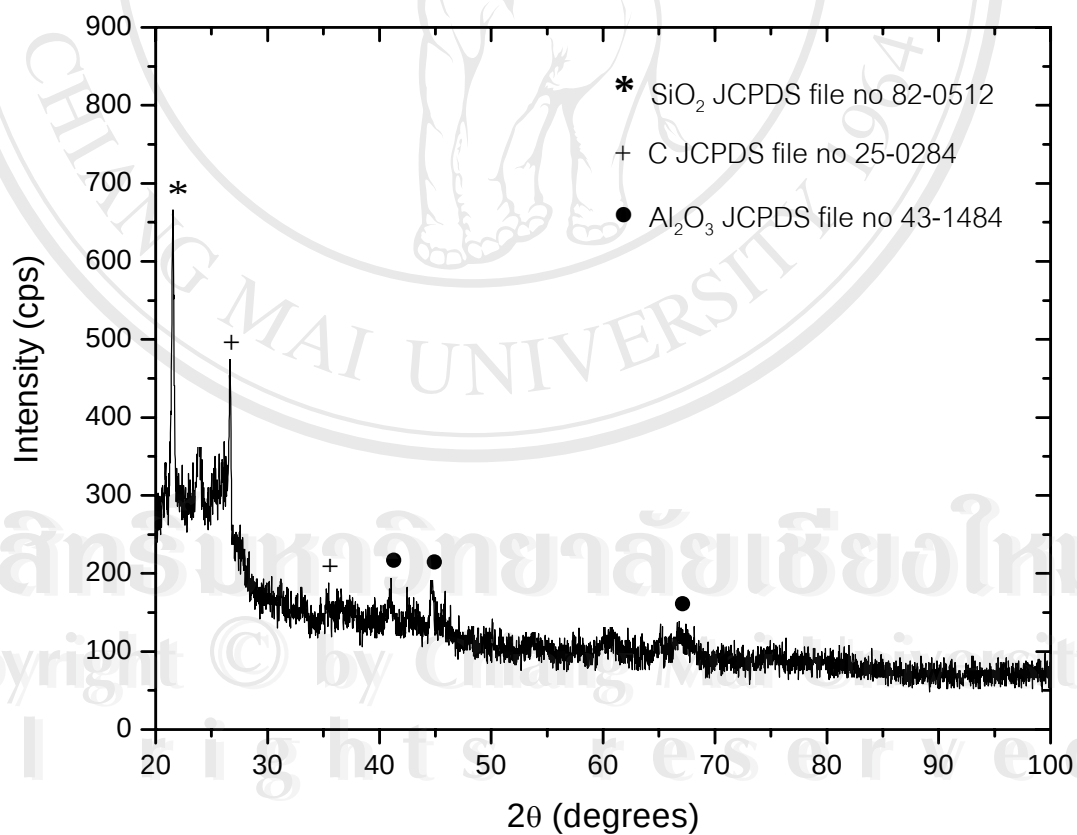
รูป 4.1 ภาพถ่าย SEM ของไผ่ดินสอที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเมื่อ (ก) กำลังขยาย 40 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 150 เท่า



รูป 4.2 สเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM ของไผ่ดินสอ

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไส้ดินสอ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	49.75	59.92
O	36.33	32.85
Na	0.29	0.19
Al	6.00	3.22
Si	6.94	3.57
S	0.12	0.05
K	0.41	0.15
Ti	0.16	0.05



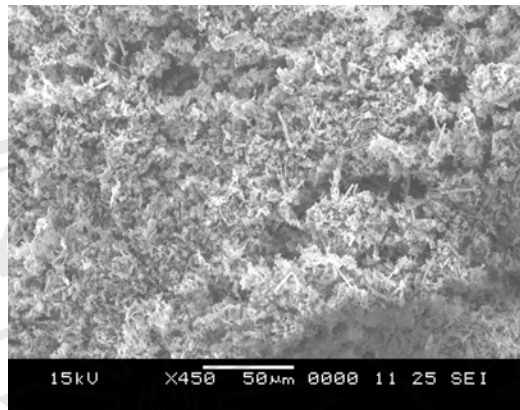
รูป 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไส้ดินสอ

4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$

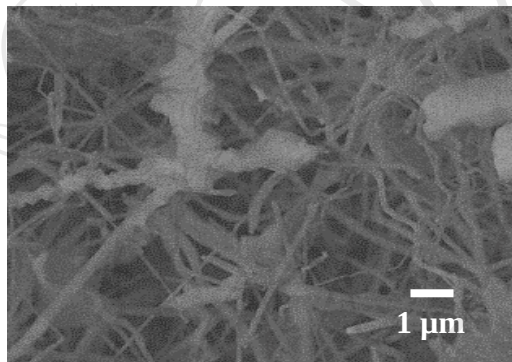
จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ด้วยเทคนิค SEM เมื่อศึกษาที่กำลังขยาย 450 เท่า พบว่าเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ มีการเกาะตัวเป็นก้อน ดังรูป 4.4(ก) จากนั้นศึกษาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังรูป 4.4 (ข) สามารถสังเกตลักษณะรูปร่าง และขนาดของเส้นใยนาโนชัดเจนขึ้น เส้นใยนาโนที่พบมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง มีผิวค่อนข้างเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 50 ถึง 150 นาโนเมตร โดยส่วนใหญ่เส้นใยนาโนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 90-130 นาโนเมตร ดังรูป 4.6 แสดงการจำแนกขนาดเส้นใยนาโน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด (รูป 4.5) พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C, O, Al และ Si ด้วยปริมาณดังตาราง 4.3 เป็นองค์ประกอบ ผลการวิเคราะห์พบธาตุ Al เป็นองค์ประกอบมากที่สุดในปริมาณ 55 wt% ดังสเปกตรัมการวิเคราะห์แสดงในรูป 4.5(ข) จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ดังรูป 4.7(ก) แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีดังตาราง 4.4 และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบจุดตรงบริเวณภายในของเส้นใยนาโนดังรูป 4.8(ก) แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีดังตาราง 4.5 ก็พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน และทุกวิธีการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Al มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนัก

สาเหตุที่ปริมาณของธาตุ Al ที่ตรวจพบในเส้นใยนาโนมากที่สุด ทั้งที่ปริมาณของธาตุนี้ซึ่งตรวจพบในสารตั้งต้นนั้นมีปริมาณ 6 wt% ซึ่งน้อยกว่าธาตุ C (49.75wt%) และ Si (6.94wt%) นั้น คาดว่าเนื่องจาก Al เป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีค่าพลังงานไอออไนเซชันต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกธาตุที่พบในสารตั้งต้น ดังนั้นจึงทำปฏิกิริยาเคมีกับธาตุอื่นได้ดีที่อุณหภูมิสูงและรวมตัวเป็นสารประกอบกับธาตุอื่นได้ง่าย แต่สำหรับธาตุ C ซึ่งพบในปริมาณที่มากกว่า Al ในสารตั้งต้นนั้นไม่น่าจะเป็นสารซึ่งจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพราะว่าเป็นธาตุที่มีปริมาณมาก ดังนั้นสารซึ่งจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาน่าจะเป็น Al หรือ Si มากกว่า สามารถสังเกตเห็นได้ว่าหลังจากกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนสิ้นสุดลง จะพบว่ามีเส้นใยนาโนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวด้านนอกของไส้ดินสอ และพบสารตั้งต้นซึ่งเป็นสีดำของแกรไฟต์ หรือ C เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีจำนวนมาก ดังรูป 3.5 และรูป 3.6 ดังนั้นจึงทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ C ที่ตรวจพบในเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักน้อยกว่าธาตุ Al ดังแสดงในตาราง 4.3 ตาราง 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

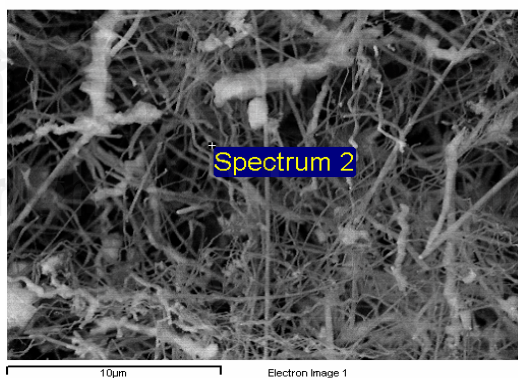


(ก)

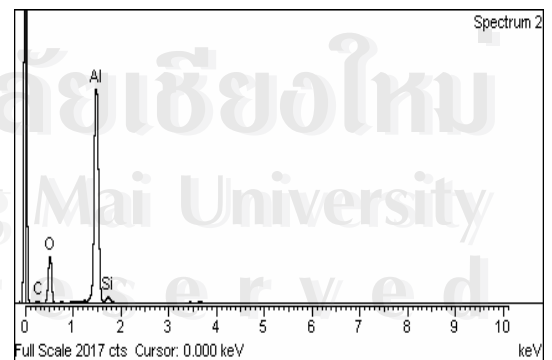


(ข)

รูป 4.4 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 450 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

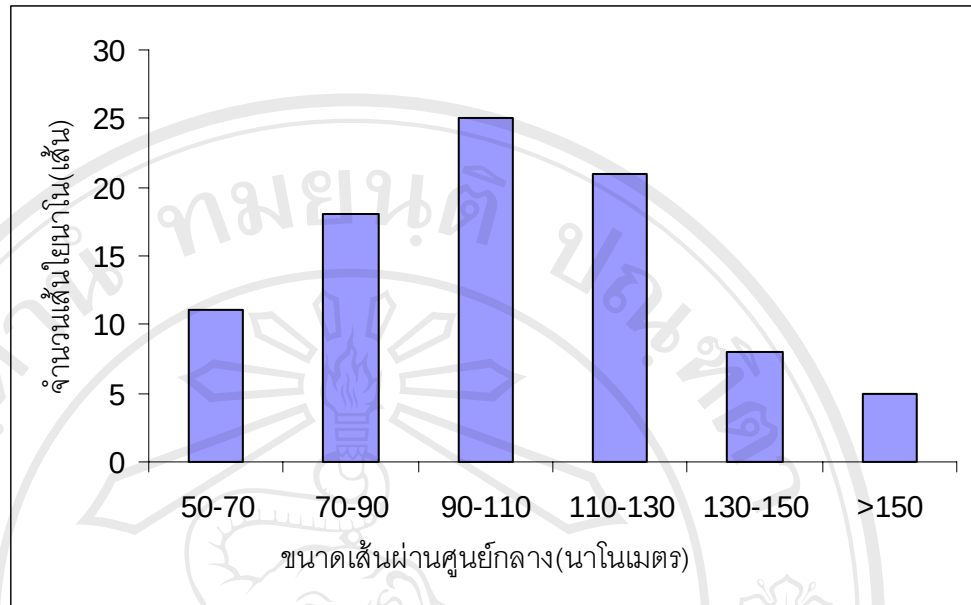


(ก)



(ข)

รูป 4.5 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบจุดเมื่อ (ก) เส้นใยที่วิเคราะห์ และ (ข) สเปกตรัมวิเคราะห์



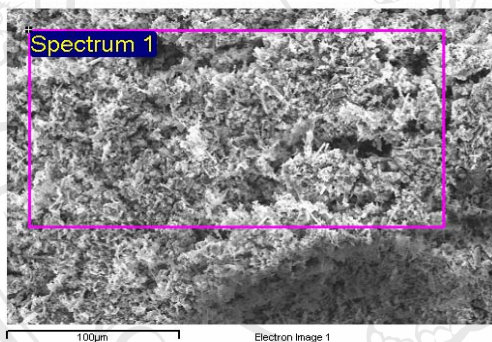
รูป 4.6 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$

ตาราง 4.2 การจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$

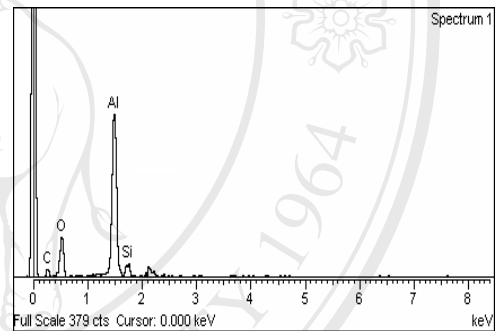
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (μm)	จำนวนเส้นใย	เปอร์เซ็นต์
50-70	11	12.50
70-90	18	20.45
90-110	25	28.41
110-130	21	23.86
130-150	8	9.09
>150	5	5.68

ตาราง 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด

	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	6.59	11.14
O	36.01	49.72
Al	55.00	41.40
Si	2.40	1.74



(ก)

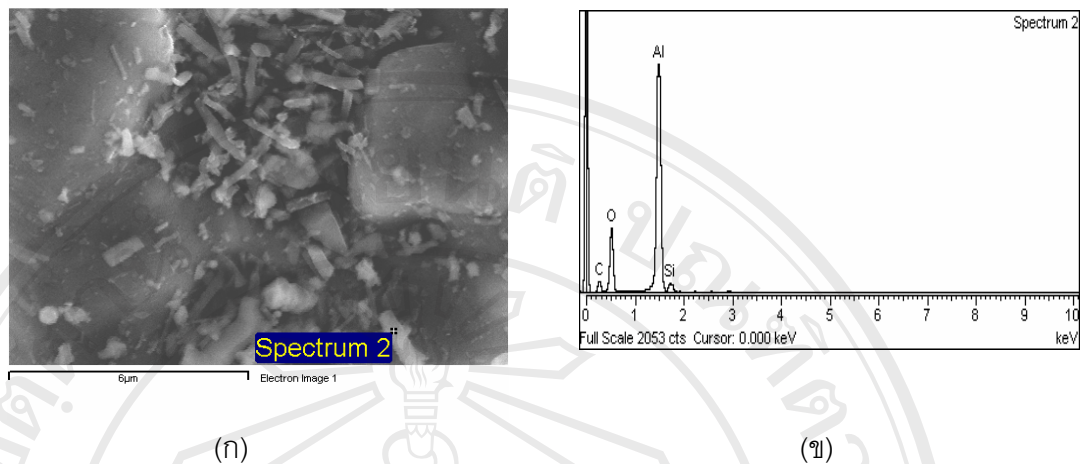


(ข)

รูป 4.7 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) พื้นที่วิเคราะห์ และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	18.30	28.03
O	34.99	40.25
Al	41.60	28.37
Si	5.11	3.35



รูป 4.8 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของอนุภาคที่แทรกอยู่ในเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ เมื่อ (ก) จุดที่วิเคราะห์ และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

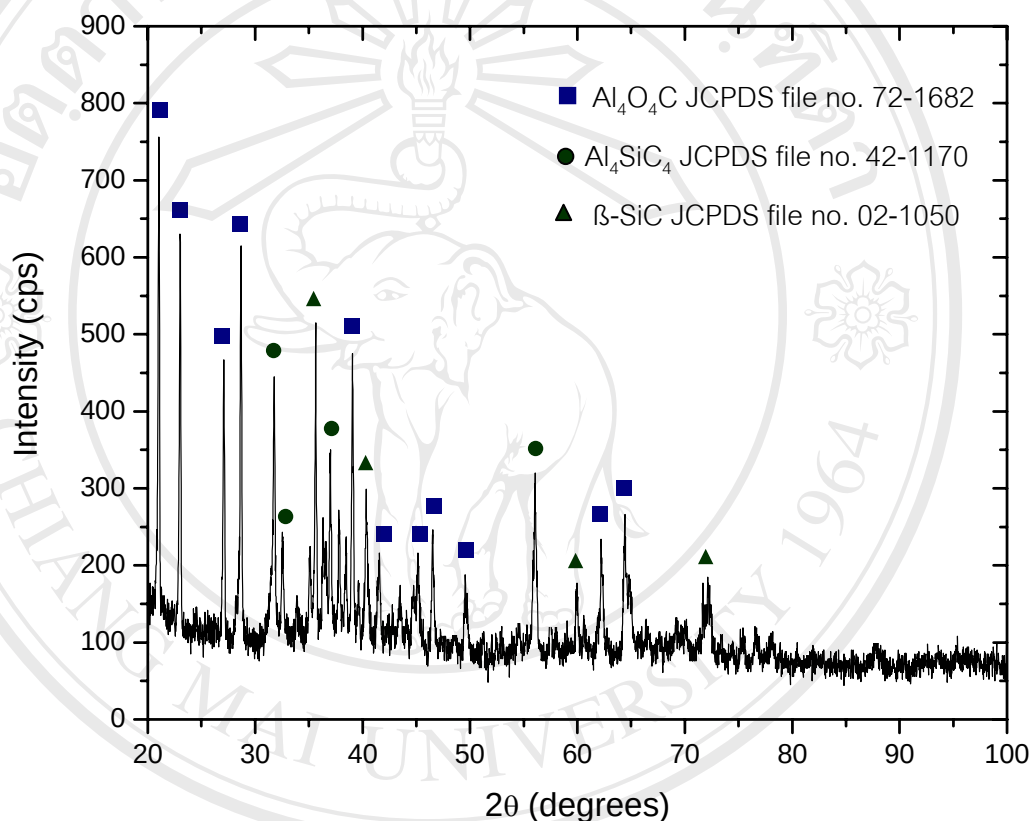
ตาราง 4.5 องค์ประกอบทางเคมีในเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS- SEM แบบพื้นที่

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	17.80	27.09
O	37.20	42.50
Al	42.55	28.82
Si	2.44	1.59

4.1.3 การตรวจสอบสารประกอบในเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$

จากการตรวจสอบเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS พบว่าเส้นใยนาโนประกอบด้วยสารประกอบหลักคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่มีโครงสร้างผลึกอยู่ในระบบคิวบิก(cubic) อะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ ($\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$) ที่มีโครงสร้างผลึกอยู่ในระบบออร์โธมบิก (orthorhombic) และ อะลูมิเนียมซิลิคอนคาร์ไบด์ (Al_4SiC_4) ที่มีโครงสร้างผลึกอยู่ในระบบออร์โธมบิก (orthorhombic) ตามมาตรฐาน JCPDS ไฟล์

หมายเลข 02-1050, 72-1682 และ 42-1170 ตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก ง องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนก็ยังมีองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในรูปสารประกอบอื่น แต่ยังไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ได้ในขณะนี้ เนื่องจากไม่สามารถแยกพีค รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยแสดงดังรูป 4.9



รูป 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน

เมื่อนำผลการทดลองจากการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาคำนวณหาร้อยละของสารประกอบที่พบในเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ซึ่งแสดงการคำนวณในภาคผนวก จ พบว่ามีสารประกอบของ $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ มากที่สุด รองมาคือ SiC Al_4SiC_4 และสารประกอบอื่นที่ไม่สามารถตรวจสอบชนิดได้ ตามลำดับ สามารถแสดงร้อยละของสารประกอบที่พบดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 แสดงร้อยละของสารประกอบในเส้นใยนาโนที่ได้จากการคำนวณความเข้มของ XRD พีคสูงสุด[22]

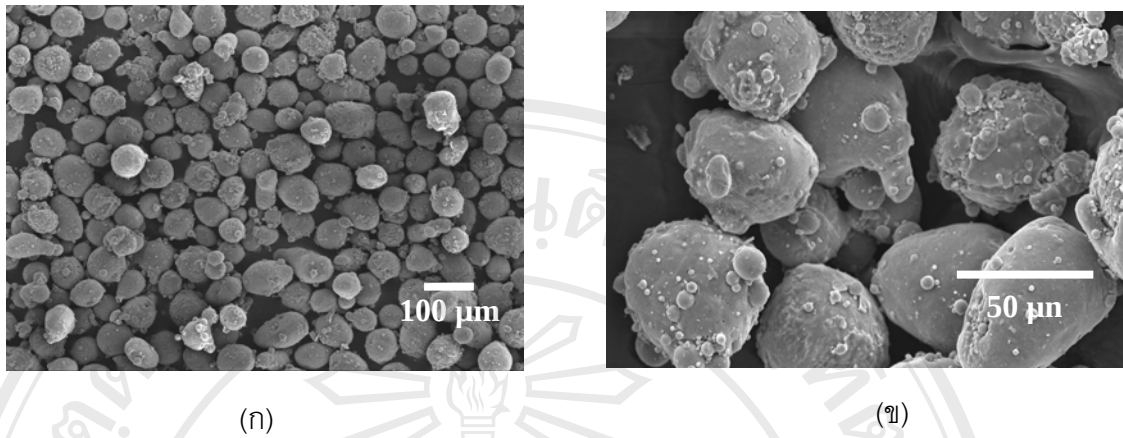
สารประกอบ	ร้อยละของสารประกอบ
$\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$	37.81
SiC	27.36
Al_4SiC_4	22.39
สารประกอบอื่นๆ	12.44

4.2 การวิเคราะห์ผงพ่นเคลือบ

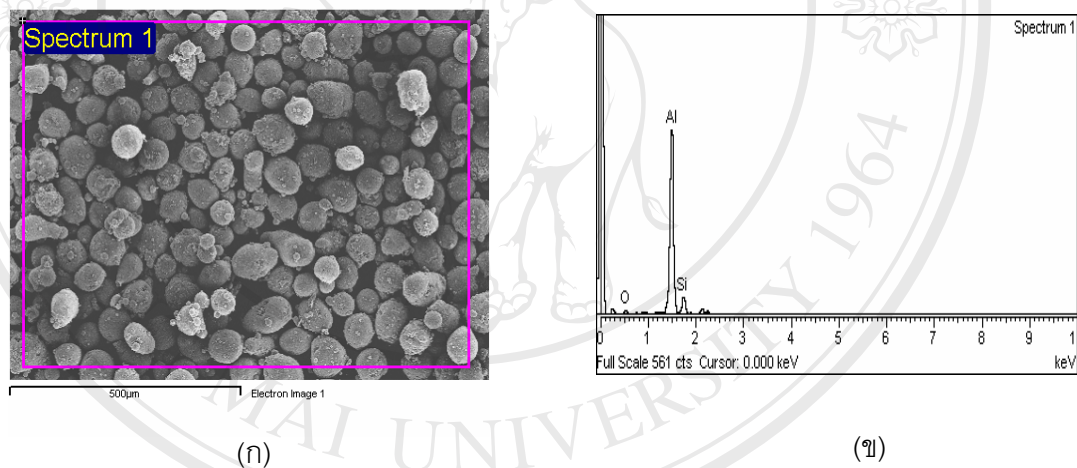
4.2.1 โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีผงเคลือบ Al-12Si

ลักษณะของผงเคลือบ Al-12Si จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ดังรูป 4.10(ก) พบว่าผงเคลือบ Al-12Si มีลักษณะค่อนข้างกลม อนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 40-100 μm โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 68 μm เมื่อวิเคราะห์ผงดังกล่าวที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังรูป 4.10 (ข) พบว่าผง Al-12Si มีผิวส่วนใหญ่อ่อนขี้เรียบ เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEMแบบพื้นที่ดังรูป 4.11(ก) พบสเปกตรัมของธาตุ Si, O และ Al เท่านั้น ดังรูป 4.11(ข) และปริมาณธาตุถูกแสดงในตาราง 4.7

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเคลือบแสดงดังรูป 4.11 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบว่าผงเคลือบอยู่ในรูปสารประกอบ Al-Si



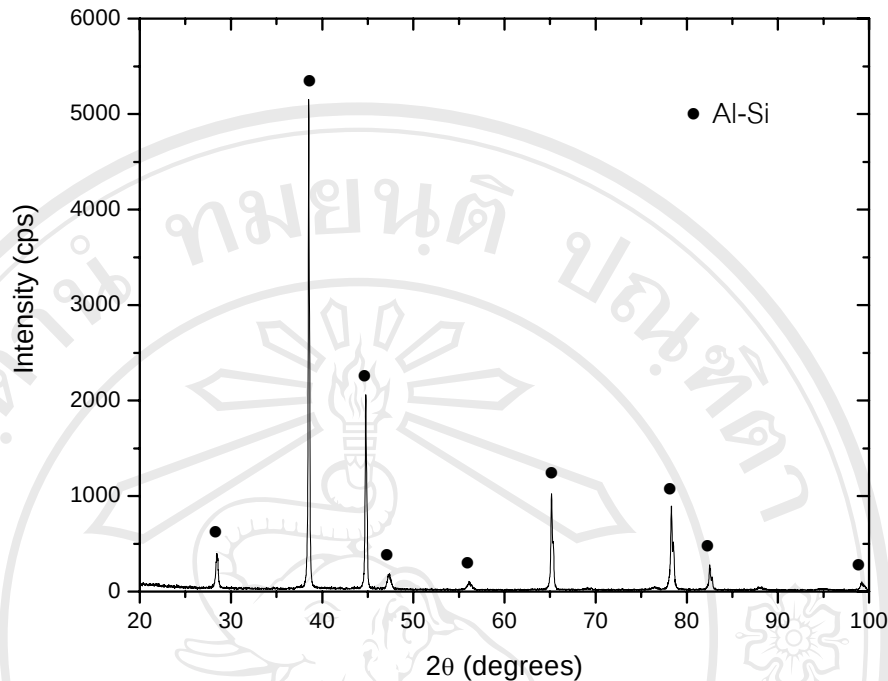
รูป 4.10 ภาพถ่าย SEM ของผงเคลือบ Al-12Si เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



รูป 4.11 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของผงเคลือบเคลือบ Al-12Si ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) พื้นที่ทำการวิเคราะห์ และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.7 องค์ประกอบทางเคมีผงเคลือบ Al-12Si

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	6.58	10.67
Al	80.09	77.01
Si	13.33	12.33



รูป 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si

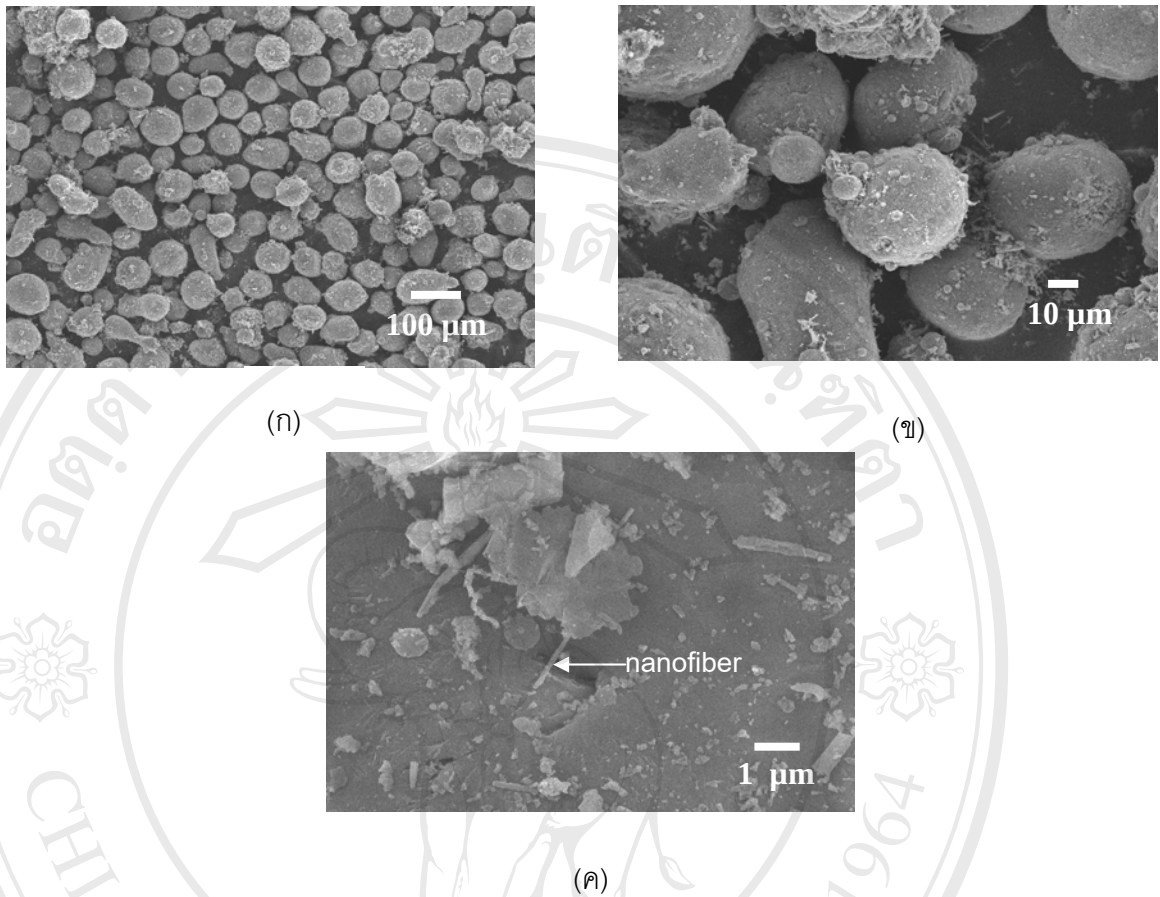
4.2.2 ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

การวิเคราะห์ลักษณะของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM พบว่าผงเคลือบมีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน และมีอนุภาคนาโนเล็กกระจายตัวอยู่ระหว่างผงเคลือบ Al-12Si ดังแสดงในรูป 4.13(ก) เมื่อศึกษาด้วยกำลังขยาย 600 เท่า รูป 4.13(ข) และกำลังขยาย 10,000 เท่ารูป 4.13(ค) พบว่าบริเวณผิวของผงเคลือบมีเส้นใยนาโนเกาะอยู่บริเวณผิวด้านนอกของผงเคลือบ Al-12Si

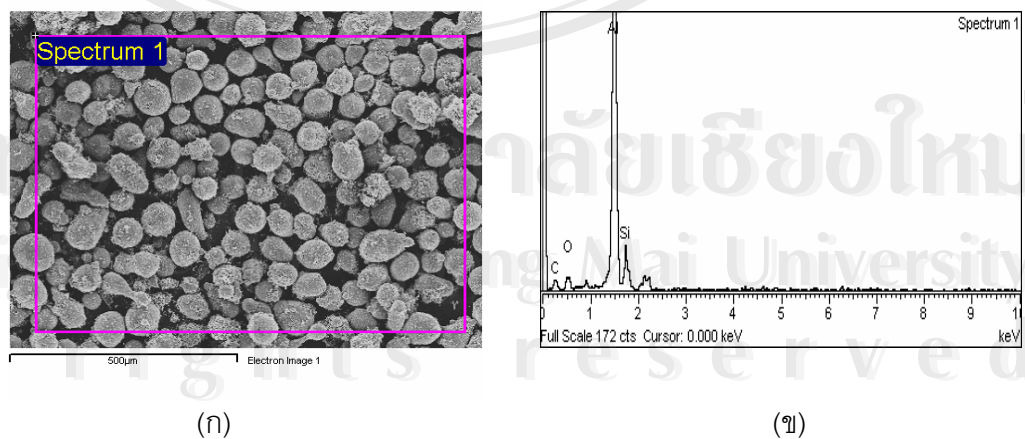
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ โดยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ดังรูป 4.14(ก) พบสเปกตรัมของธาตุ C, O, Al และ Si ดังรูป 4.14(ข) และปริมาณธาตุแสดงในตาราง 4.7 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับผงพ่นเคลือบ Al-12Si พบว่า ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีธาตุ C เป็นองค์ประกอบซึ่งไม่พบในผงพ่นเคลือบ Al-12Si คาดว่าธาตุ C ที่พบนั้นปนมากับเส้นใยนาโนที่ผสมลงในผงพ่นเคลือบ Al-12Si เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนนั้น เส้นใยนาโนจะเกิดขึ้นรอบนอกไส้ดินสอ ดังรูป 3.5 และในกระบวนการคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากไส้ดินสอจะมีบางส่วนขอ ดินสอดังรูป 3.6 ติดมากับเส้นใยด้วย ซึ่งไม่สามารถแยกออกไปได้ ดังนั้นจึงทำให้มี C ปนเปื้อนมา กับเส้นใยที่สังเคราะห์

พิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของธาตุของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ กับผงเคลือบ Al-12Si พบว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ Al และ Si ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีปริมาณที่ลดลงร้อยละ 13.22 และ 4.61 โดยน้ำหนักตามลำดับ คาดว่าเนื่องมาจากการเติมเส้นใยนาโนลงไปผงพ่นเคลือบ Al-12Si นั้น ทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของ Al และ Si ลดลง เนื่องจากมีมวลของเส้นใยนาโนเพิ่มเข้าไป จึงทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของ Al และ Si มีค่าลดลงเมื่อคิดเทียบกับน้ำหนักทั้งหมด ในขณะที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ O ก็มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจาก O เป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในอากาศ และไม่สามารถควบคุมได้ และการเตรียมผิวเคลือบก็ทำได้ในบรรยากาศห้อง

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ดังรูป 4.15 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si จากข้อมูลภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าปริมาณของผงเส้นใยนาโนที่แทรกตัวรวมอยู่กับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นน้อย เมื่อเปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนัก ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากความแตกต่างเชิงปริมาณที่มีค่ามากกว่าระหว่างผงพ่นเคลือบ Al-12Si กับเส้นใยที่ผสมลงไป และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บนผิวของผงเคลือบ และมีบางส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อย จึงทำให้ฟีกของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นฟีกของผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น



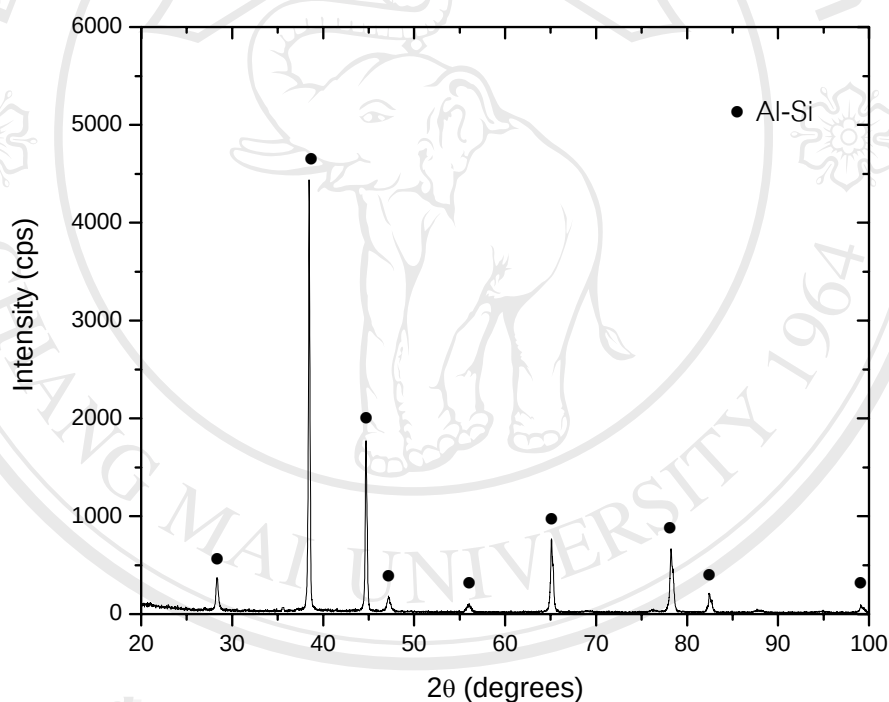
รูป 4.13 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า (ข) กำลังขยาย 600 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.14 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) พื้นที่ทำการวิเคราะห์ และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt %)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	15.51	27.86
O	8.89	11.99
Al	66.87	53.46
Si	8.72	6.70



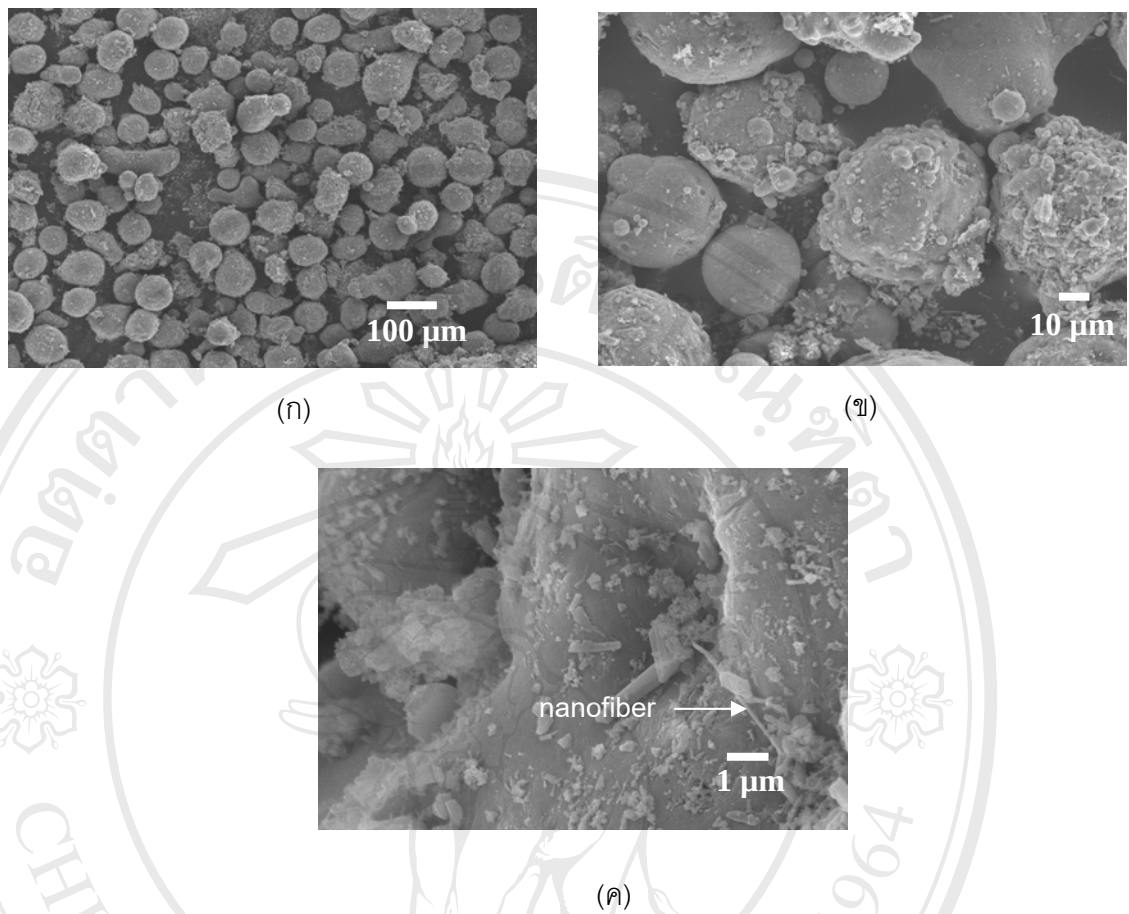
รูป 4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

4.2.3 ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

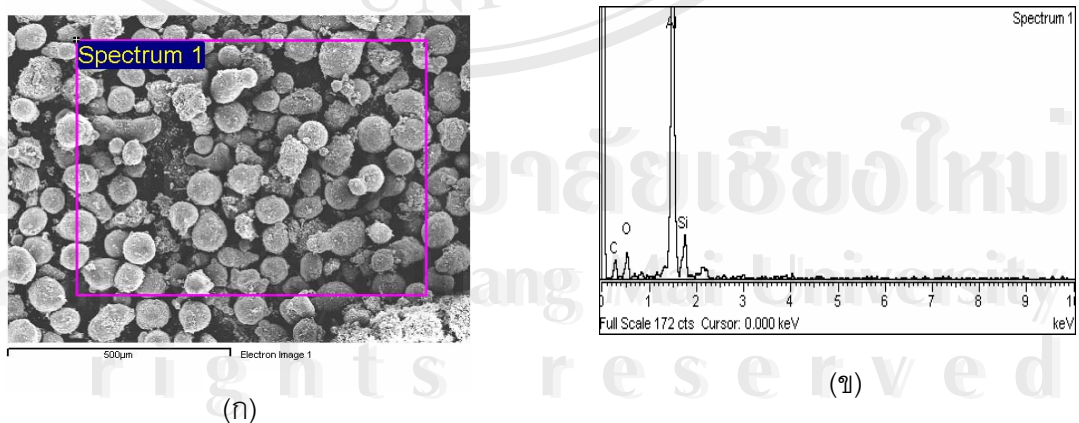
ลักษณะของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 120 เท่า ดังรูป 4.16(ก) สามารถสังเกตเห็นได้ว่าผงเคลือบมีลักษณะค่อนข้างกลมมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อศึกษาที่กำลังขยาย 600 เท่า ดังรูป 4.16(ข) และที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ดังรูป 4.16(ค) สามารถมองเห็นเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ เกาะที่บริเวณผิวของผง Al-12Si ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

Al_4SiC_4) โดยใช้เทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ พบสเปกตรัมของธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ปริมาณของธาตุแสดงในตาราง 4.9 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของ C, Al, Si ของผงพ่นเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ กับผงพ่นเคลือบ Al-12Si และ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ แล้วพบว่าธาตุ C มีปริมาณเพิ่มขึ้นในปริมาณ 27.28 wt% และ 12.27 wt% ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของ Al และ Si ลดลง คาดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนลงไปผงพ่นเคลือบ Al-12Si นั้น ก็เป็นการเพิ่มปริมาณของ C ที่เจือปนลงไปด้วยเพราะ C เป็นธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนแต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผง Al-12Si นอกจากนี้กระบวนการการคัดแยกเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ก็มีส่วนของสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยแกรไฟต์ติดมาด้วย ดังรูป 3.6 ดังนั้นการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบ Al-12Si จึงทำให้ตรวจพบว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ C เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.18 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากความแตกต่างเชิงปริมาณที่มีค่ามากระหว่างผงพ่นเคลือบ Al-12Si กับเส้นใยนาโนที่ผสมลงไป และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บนผิวของผงเคลือบ และมีบางส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อย จึงทำให้พิกของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นพิกของผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจพบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปได้



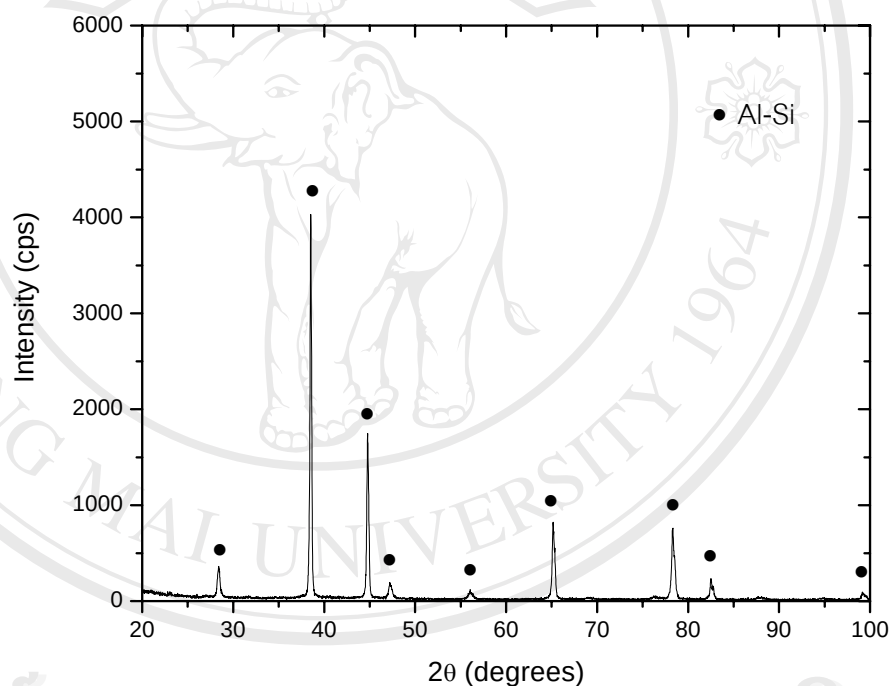
รูป 4.16 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า (ข) กำลังขยาย 600 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.17 การวิเคราะห์ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	27.78	43.28
O	14.34	16.77
Al	50.85	35.26
Si	7.04	4.69



รูป 4.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

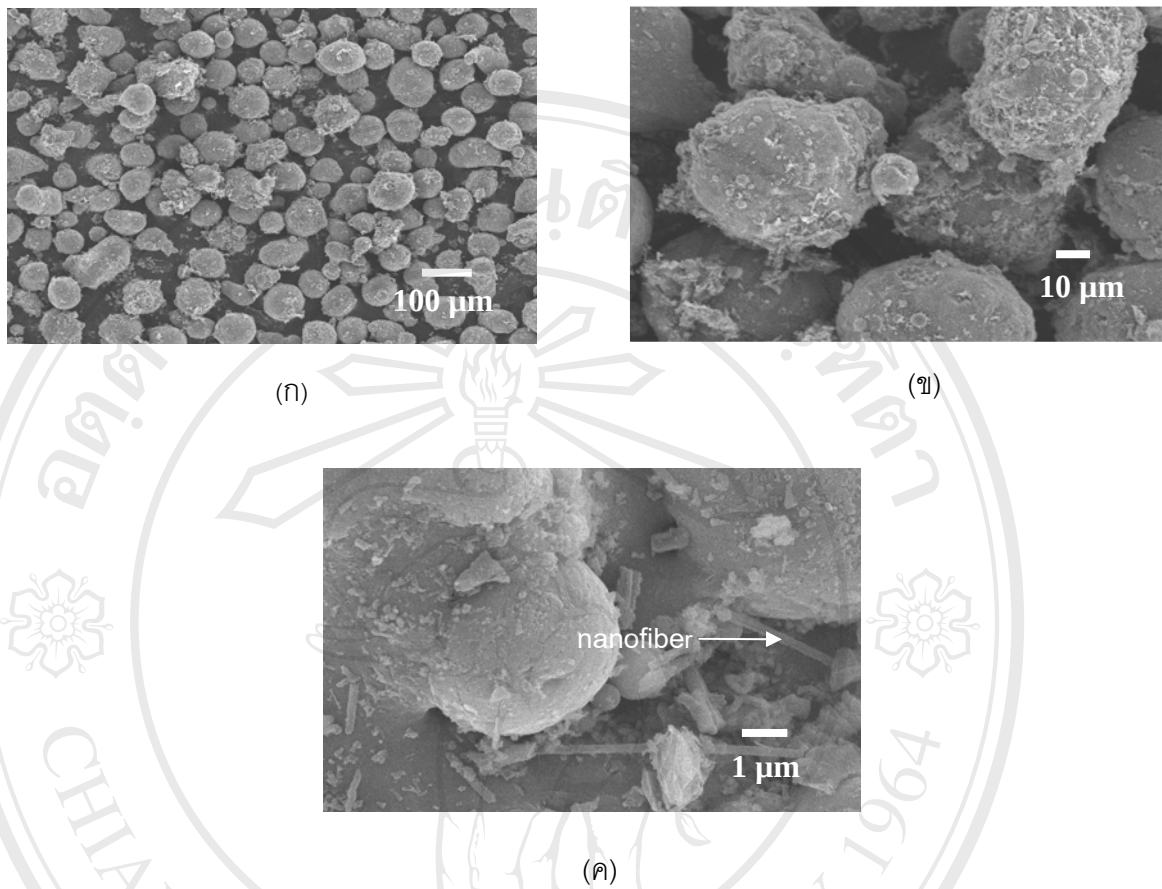
4.2.4 ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

วิเคราะห์ลักษณะของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 120 เท่า พบว่าผงเคลือบส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป 4.19(ก) เมื่อศึกษาด้วยกำลังขยาย 600 เท่า ดังรูป 4.19(ข) และกำลังขยาย 10,000 เท่า ดังรูป 4.19(ค) พบว่าบริเวณผิวของผงเคลือบมีเส้นใยนาโนเกาะอยู่บริเวณผิวด้านนอกของผงเคลือบ Al-12Si และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM

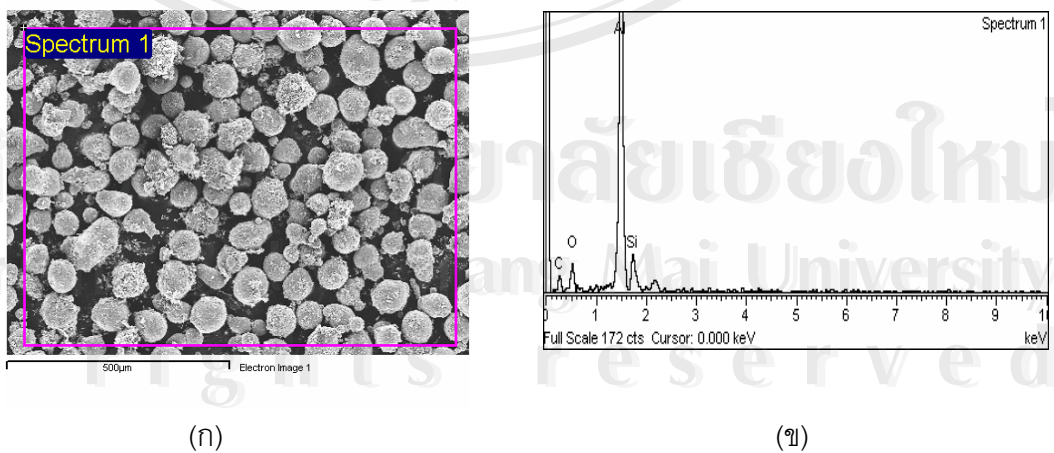
แบบพื้นที่ดังรูป 4.20(ก) พบสเปกตรัมของธาตุ C, O, Al และ Si ดังรูป 4.20(ข) ด้วยปริมาณแสดงดังตาราง 4.10

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของ C, Al, Si ของผงพ่นเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ กับผงพ่นเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณที่น้อยกว่านี้ แล้วพบว่าธาตุ C มีปริมาณเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของ Al และ Si ลดลง คาดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนลงไปในผงพ่นเคลือบ Al-12Si นั้น ก็เป็นการเพิ่มปริมาณของ C ที่เจือปนลงไปด้วย เพราะ C เป็นธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนแต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผง Al-12Si นอกจากนี้กระบวนการการคัดแยกเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ก็มีส่วนของสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยแกรไฟต์ติดมาด้วยดังรูป 3.6 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของเส้นใยนาโนลงในผง Al-12Si จึงทำให้ตรวจพบปริมาณธาตุ C เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.21 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากปริมาณผงที่ผสมลงไปไม่มากพอเมื่อเปรียบเทียบเชิงปริมาณกับผงเคลือบหลัก Al-12Si ยังมีความแตกต่างเชิงปริมาณที่มีค่ามาก และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บนผิวของผงเคลือบ และมีส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อย จึงทำให้พีคของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นพีคของผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจพบสารประกอบซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน



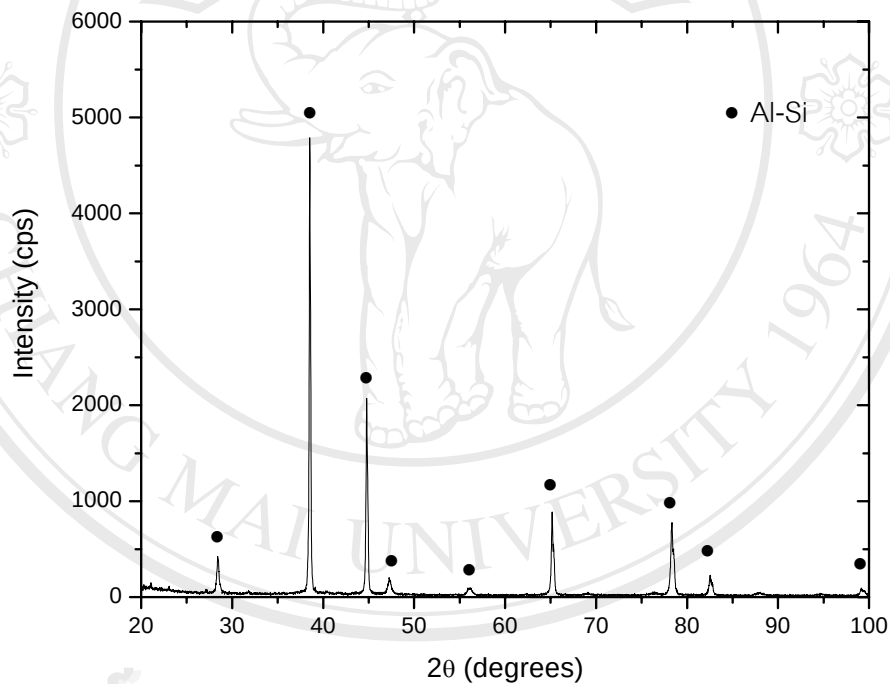
รูป 4.19 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 600 เท่า (ค) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.20 การวิเคราะห์ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	29.32	45.18
O	13.83	16.00
Al	50.24	34.46
Si	6.62	4.36



รูป 4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

4.2.5 ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

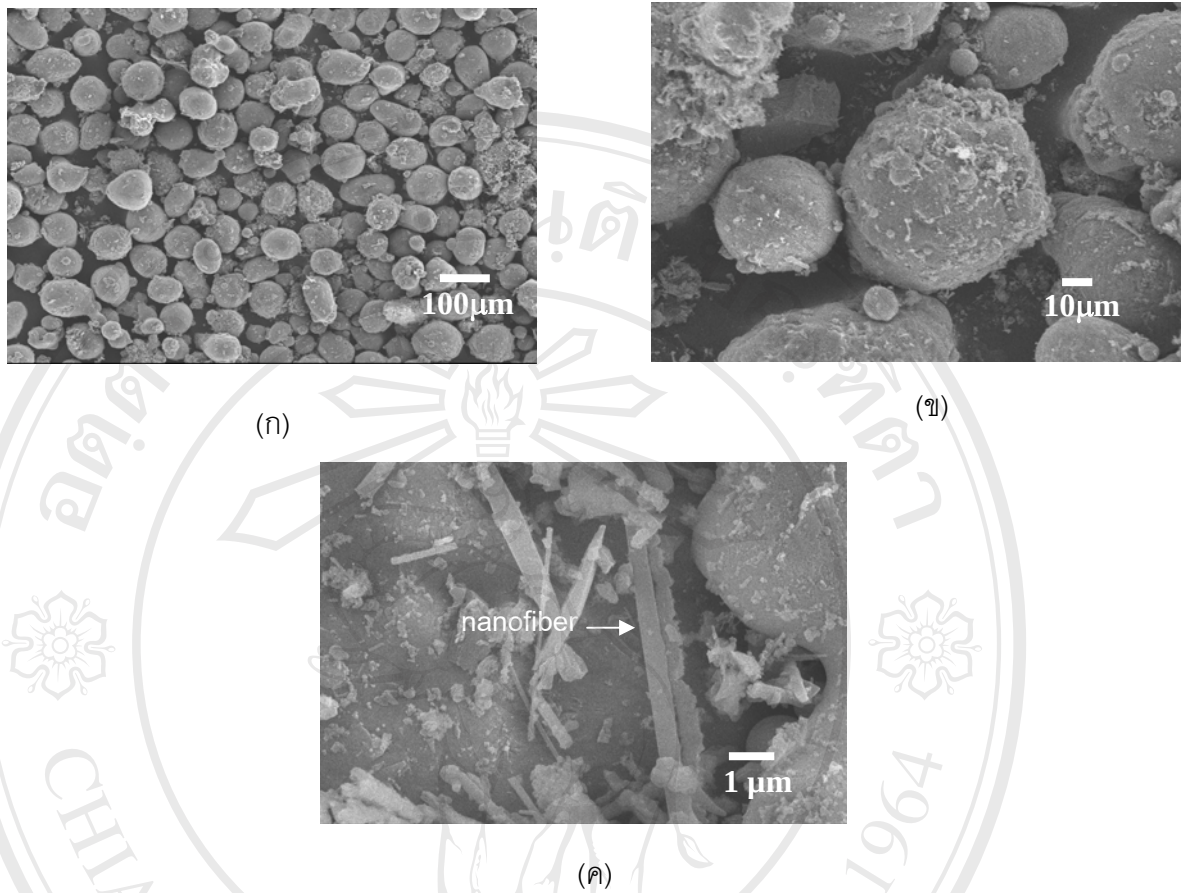
การวิเคราะห์ลักษณะของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 120 เท่า ดังรูป 4.22(ก) พบว่าผงเคลือบมีลักษณะส่วนใหญ่ค่อนข้างกลม และมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อศึกษาด้วยกำลังขยาย 600 เท่า ดังรูป 4.22(ข) และกำลังขยาย 10000 เท่า ดังรูป 4.22(ค) พบเส้นใยนาโนเกาะอยู่บริเวณผิวของผงเคลือบ Al-12Si และมีบางส่วนกระจายตัวอยู่ระหว่างผิวของผงเคลือบ ปริมาณเส้นใยที่พบมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อ

เปรียบเทียบกับผงเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ

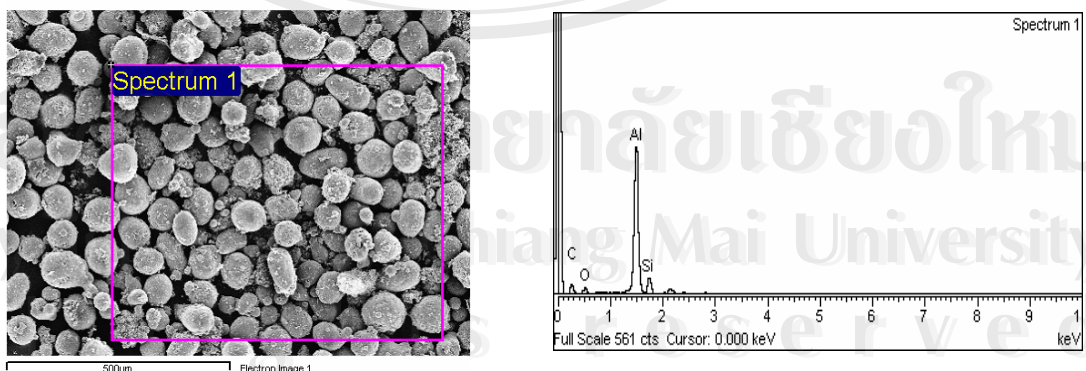
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ดังรูป 4.23(ก) พบสเปกตรัมของธาตุ C, O, Al และ Si ดังรูป 4.23(ข) และปริมาณธาตุแสดงในตาราง 4.11 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับผงพื้นเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มี C ในปริมาณเพิ่มขึ้น และมีปริมาณที่มากกว่าทุกผงเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโนในอัตราส่วนที่น้อยกว่านี้ ในขณะที่ปริมาณของ Al ลดลง ส่วนปริมาณของ Si กลับเพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผงที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก คาดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนลงไปผงพื้นเคลือบ Al-12Si นั้น ก็เป็นการเพิ่มปริมาณของ C ที่เจือปนลงไปด้วย เพราะ C เป็นธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน แต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผง Al-12Si นอกจากนี้กระบวนการการกัดแยกเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ก็มีส่วนของสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยแกรไฟต์ติดมาด้วยดังรูป 3.6 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของเส้นใยนาโนลงในผง Al-12Si จึงทำให้ตรวจพบปริมาณธาตุ C เพิ่มขึ้น

ในขณะที่ปริมาณของ Al เมื่อคิดเทียบร้อยละโดยน้ำหนัก เมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปแล้วทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลง สำหรับปริมาณของ Si ถ้าเปรียบเทียบกับผงเคลือบที่ไม่ผสมเส้นใยนาโน และผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแล้ว ก็ยังคงมีปริมาณที่ลดลง

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.24 และเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับมาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากปริมาณผงที่ผสมลงไปไม่มากพอ ยังมีความแตกต่างเชิงปริมาณที่มีค่ามากระหว่างผงพื้นเคลือบ Al-12Si กับเส้นใยนาโนที่ผสมลงไป และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพื้นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บนผิวของผงเคลือบ และมีบางส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อยจึงทำให้พีคของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นพีคของผงพื้นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจพบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปได้



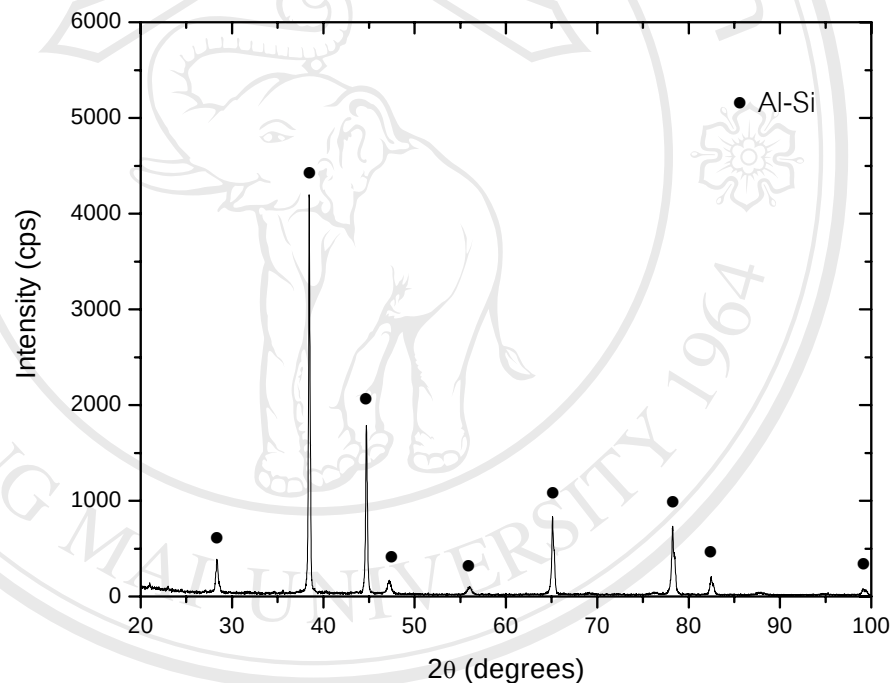
รูป 4.22 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 600 เท่า (ค) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.23 การวิเคราะห์ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก(wt%)	ร้อยละโดยอะตอม(at%)
C	35.44	52.98
O	9.34	10.49
Al	47.27	31.45
Si	7.95	5.08



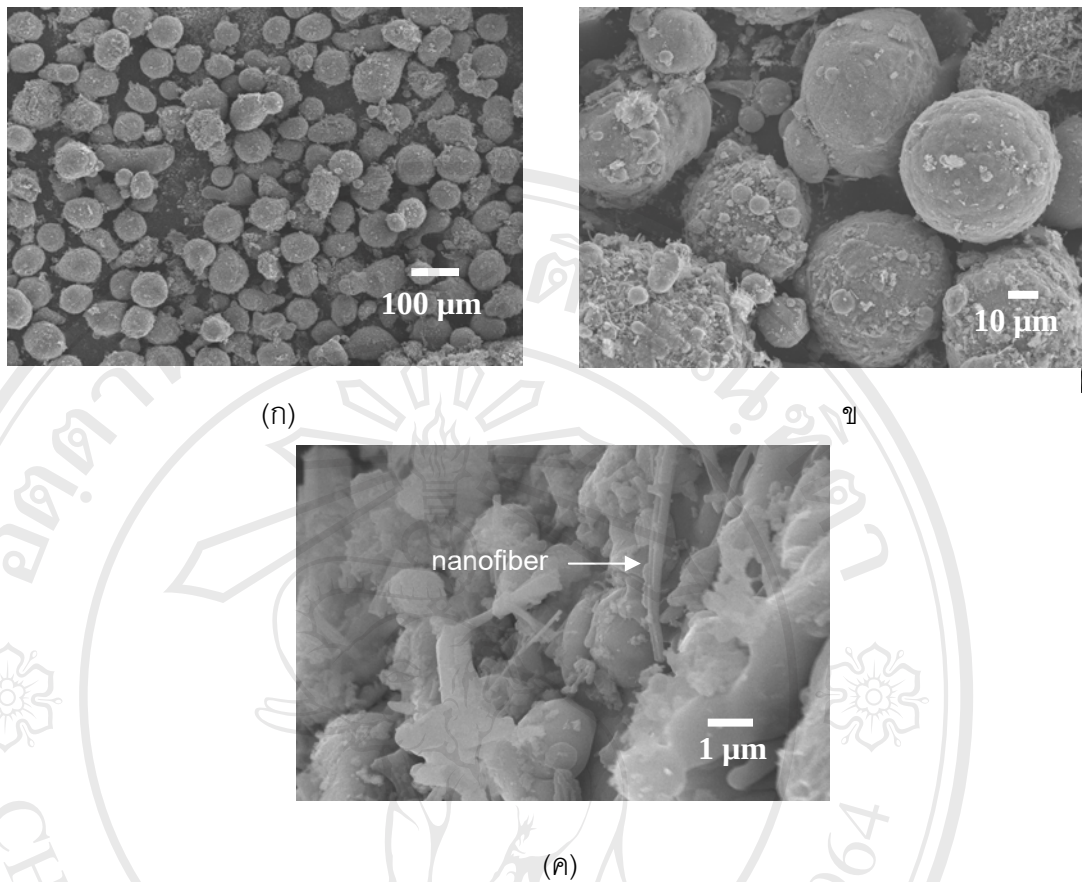
รูป 4.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

4.2.6 ผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

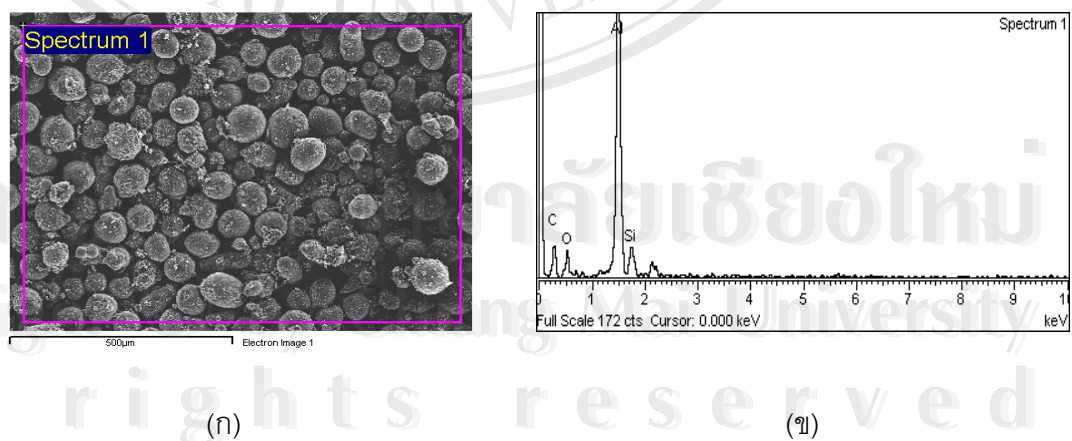
ลักษณะของผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 120 เท่า ดังรูป 4.25(ก) พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ระหว่างผิวเคลือบ Al-12Si เมื่อศึกษาที่กำลังขยาย 600 เท่า ดังรูป 4.25(ข) และที่กำลังขยาย 10000 เท่า ดังรูป 4.25(ค) พบว่ามีเส้นใยนาโนเกาะอยู่ที่ผิวของผงเคลือบ Al-12Si หนาแน่นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณอื่นๆ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่แบบพื้นที่ดังรูป 4.26(ก) พบสเปกตรัมของธาตุ C, O, Al และ Si ดังรูป 4.26(ข) และปริมาณธาตุแสดงในตาราง 4.12 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับผงพ่นเคลือบ Al-12Si พบว่าผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีธาตุ C เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผงพ่นเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณทุกอัตราส่วน คาดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนลงไปในผงพ่นเคลือบ Al-12Si นั้น ก็เป็นการเพิ่มปริมาณของ C ที่เจือปนลงไปด้วยเพราะ C เป็นธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนแต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผง Al-12Si และในกระบวนการคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากไส้ดินสอ นั้นจะมีบางส่วนของดินสอหรือ C ติดมากับเส้นใยด้วย ซึ่งไม่สามารถแยกออกไปได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงทำให้มี C ปนเปื้อนมากับเส้นใย และถูกผสมลงไปกับผงพ่นเคลือบด้วย สำหรับปริมาณของ Al และ Si นั้นมีปริมาณที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงเคลือบที่ผสมเส้นใยในทุกปริมาณการผสม

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.27 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากปริมาณผงที่ผสมลงไปไม่มากพอเมื่อเปรียบเทียบกับผงเคลือบหลัก Al-12Si ยังมีความแตกต่างเชิงปริมาณที่มีค่ามาก และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บนผิวของผงเคลือบ และมีบางส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อยและไม่สามารถตรวจพบโดยวิธีนี้ ดังนั้นจึงทำให้พีคของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นพีคของผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจพบสารประกอบซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน



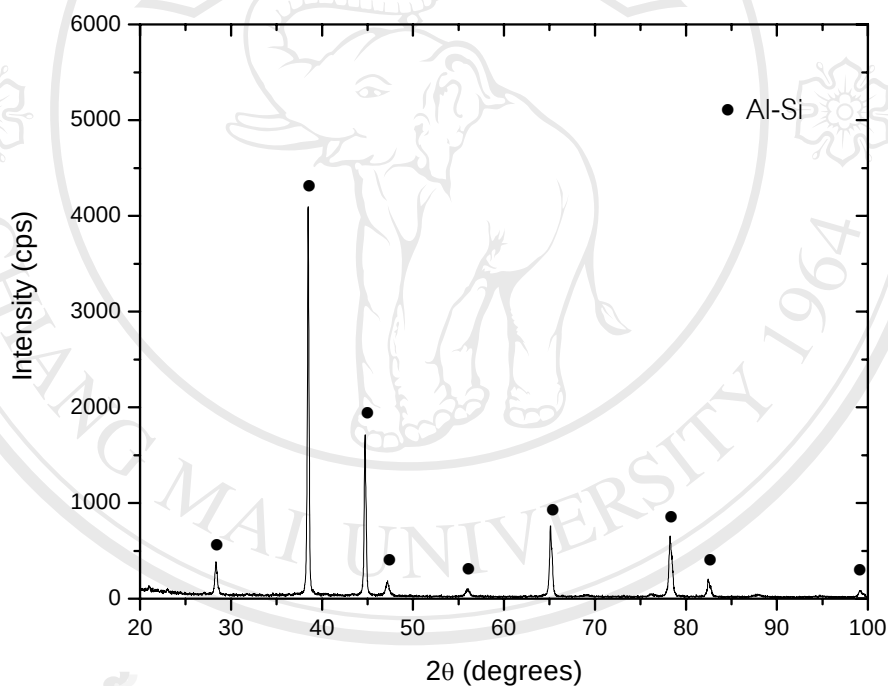
รูป 4.25 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า (ข) กำลังขยาย 600 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.26 การวิเคราะห์ผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วย EDS - SEM แบบพื้นที่ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 120 เท่า และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	36.94	56.63
O	12.98	14.14
Al	44.25	28.60
Si	5.83	3.62



รูป 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังกล่าว พบว่าผงเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ จะมีเฟสเล็กๆ แทรกอยู่ระหว่างผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งเฟสดังกล่าวเมื่อทำการวิเคราะห์ที่ กำลังขยาย สูงประมาณ 10,000 เท่า พบว่าเป็นเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ โดยเส้นใยนาโน จะเกาะอยู่ที่ผิวของผงเคลือบ หรือเกาะตัวกันเป็นก้อนแล้วแทรกอยู่ระหว่างผงเคลือบ และเมื่อผสม

เส้นใยนาโนในปริมาณที่มากขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้ว่าจะมีเฟสเหล่านี้แทรกอยู่ระหว่างผงเคลือบมากขึ้นตามปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตาราง 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si เมื่อผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณต่างๆ

ผง	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)				ร้อยละโดยอะตอม (at%)			
	C	O	Al	Si	C	O	Al	Si
Al-12Si	0	6.58	80.09	13.33	0	10.67	77.01	12.32
Al-12Si+5(SiC-Al ₄ O ₄ C-Al ₄ SiC ₄)	15.51	8.89	66.87	8.72	27.86	11.99	53.46	6.70
Al-12Si+10(SiC-Al ₄ O ₄ C-Al ₄ SiC ₄)	27.78	14.34	50.85	7.04	43.28	16.77	35.26	4.69
Al-12Si+15(SiC-Al ₄ O ₄ C-Al ₄ SiC ₄)	29.32	13.83	50.24	6.62	45.18	16.00	34.46	4.36
Al-12Si+20(SiC-Al ₄ O ₄ C-Al ₄ SiC ₄)	35.44	9.34	47.27	7.95	52.98	10.49	31.45	5.08
Al-12Si+25(SiC-Al ₄ O ₄ C-Al ₄ SiC ₄)	36.94	12.98	44.25	5.83	56.63	14.14	28.60	3.62

การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ดังแสดงในตาราง 4.13 พบว่าผงเคลือบ Al-12Si ไม่มีธาตุ C เป็นองค์ประกอบ แต่มีธาตุ O ประมาณร้อยละ 6.67 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS มาตรฐานไฟล์หมายเลข 41-1222 ซึ่งเป็นสารประกอบ อะลูมิเนียมซิลิคอน (Al_{3.21}SiO_{4.7}) แสดงให้เห็นว่าโดยปกติแล้วผงที่นำมาพ่นเคลือบก็มีออกไซด์อยู่ในเม็ดผงพ่นเคลือบอยู่แล้ว นอกจากนี้การที่ผงเคลือบโลหะอัลลอยด์ซึ่งถูกเก็บไว้และสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานก็สามารถทำให้เกิดออกไซด์ได้ จึงทำให้ตรวจพบธาตุ O ดังกล่าว

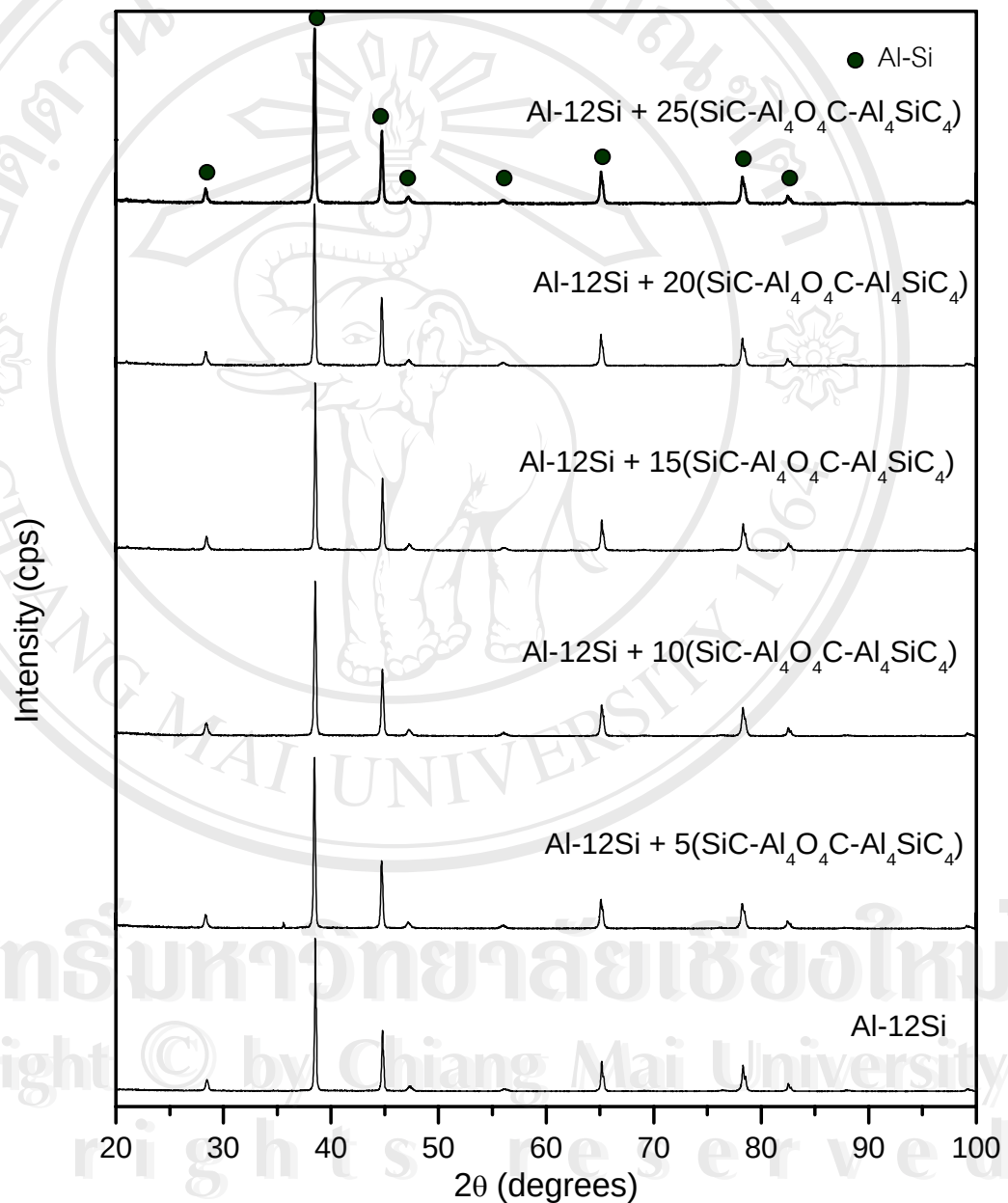
สำหรับผงเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ พบว่าปริมาณของธาตุ C แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเส้นใยนาโนปริมาณที่มากขึ้น สันนิษฐานว่าธาตุ C ที่พบนั้นเป็นธาตุ C ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนเอง และอีกส่วนหนึ่งก็คาดว่าจะปนมากับเส้นใยนาโนที่ผสมลงในผงพ่นเคลือบ Al-12Si เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนนั้น เส้นใยนาโนจะเกิดขึ้นรอบนอกไส้ดินสอ ดังรูป 3.5 และในกระบวนการคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากไส้ดินสอนั้นจะมีบางส่วนของดินสอ ติดมากับเส้นใยนาโนด้วย ซึ่งไม่สามารถแยกส่วนที่เป็นไส้ดินสอออกไปได้หมดดังรูป 3.6 ดังนั้นจึงทำให้มี C ปนเปื้อนมากับเส้นใยที่สังเคราะห์

ปริมาณของธาตุ Al แสดงแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณของธาตุ Si นั้น จากข้อมูลก็แสดงให้เห็นว่า มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับธาตุ Al เมื่อผสมเส้นใยนาโนมากขึ้น ยกเว้นผงผสม Al-12Si + 20(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) นั้น พบว่าปริมาณของธาตุ Si นั้นกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุ Si ในผงผสมเส้นใยนาโน ร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก แนวโน้มปริมาณของ Al และ Si ที่ลดลงนั้น สันนิษฐานว่าอาจจะเนื่องมาจากการเติมเส้นใยนาโนลงไปในผงพ่นเคลือบ Al-12Si ทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของ Al และ Si ลดลง เนื่องจากมีมวลของเส้นใยนาโนเพิ่มเข้าไป จึงทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของ Al และ Si มีค่าลดลงเมื่อคิดเทียบร้อยละกับน้ำหนักรวม

ข้อสันนิษฐานสำหรับกรณีปริมาณของ Si ในผงผสม Al-12Si + 20(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) นั้นคาดว่า เนื่องมาจากปริมาณของออกซิเจนที่ไม่สามารถควบคุมได้ จากข้อมูลจะเห็นว่าปริมาณของ O ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้น ดังตาราง 4.13 ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณของ Si เมื่อคิดเปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักกับธาตุอื่นเปลี่ยนไปในลักษณะเบี่ยงเบนจากแนวโน้มที่น่าจะเป็น เพราะว่า Si เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยที่สุด และมีค่าแตกต่างที่มากเมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุ Al และ C ที่มีอยู่ในผงผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ O ซึ่งไม่คงที่เพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลต่อค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุ Al และ C แต่จะมีผลต่อ Si เมื่อเปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักรวม

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD พบว่าองค์ประกอบทางเคมีในรูปของสารประกอบ Al-Si เพียงอย่างเดียว แต่ไม่สามารถที่จะตรวจพบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปทุกๆ อัตราส่วนของปริมาณการผสม ดังรูป 4.28 จากการทดลองสันนิษฐานว่าเนื่องจากปริมาณผงนาโนที่ผสมลงไปไม่มากพอเมื่อเปรียบเทียบกับผงเคลือบหลัก Al-12Si และในการผสมเส้นใยนาโนเข้ากับผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si นั้นก็ใช้วิธีการผสมแบบบดย่อยด้วยลูกบอล จึงทำให้เส้นใยนาโนเกาะอยู่บน

ผิวของผงเคลือบ และมีบางส่วนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงมีค่าน้อย ดังนั้นพีคของกราฟที่ปรากฏชัดเจนเป็นพีคของผงพ่นเคลือบหลัก Al-12Si เท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจพบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปได้ด้วยเทคนิค XRD



รูป 4.28 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงพ่นเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

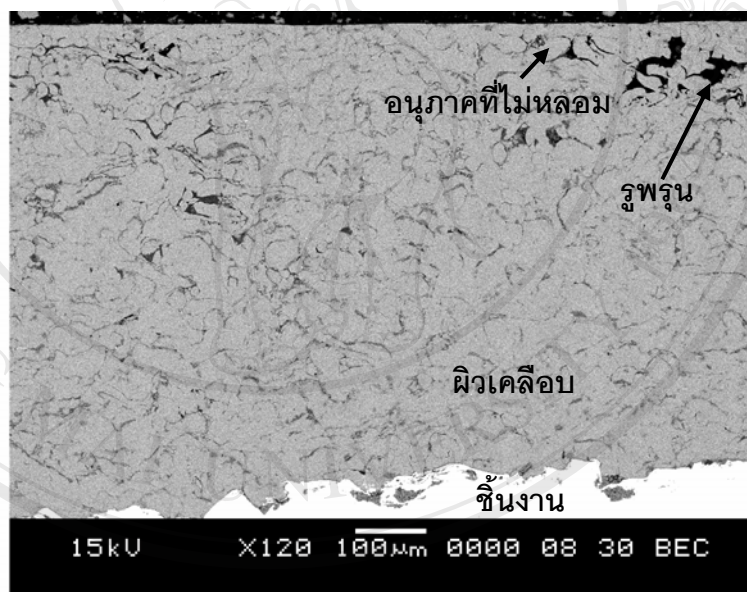
4.4 การวิเคราะห์ผิวเคลือบ

ในการวิเคราะห์ผิวเคลือบได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

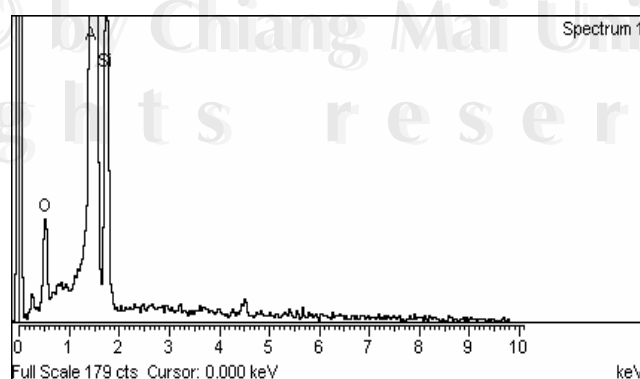
- 1) วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค BSE-SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่
- 2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ
- 3) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปของสารประกอบของผิวเคลือบด้วยเทคนิค XRD

4.4.1 ผิวเคลือบ Al -12Si

4.4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค BSE-SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM



รูป 4.29 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si กำลังขยาย 120 เท่า



รูป 4.30 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si

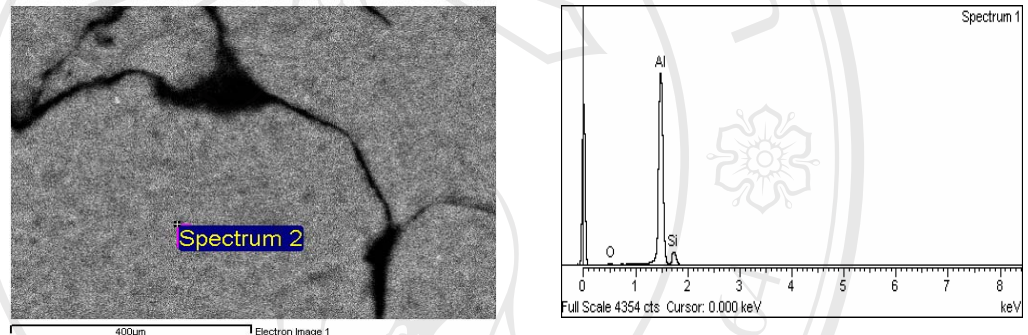
ตาราง 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ Al-12Si

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	6.67	10.82
Al	78.94	75.89
Si	14.39	13.29

จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ Al-12Si ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.29 พบว่าผิวเคลือบมีความหนาประมาณ 600 μm มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar อนุภาคของผิวเคลือบมีการเกาะกัน cohesion ค่อนข้างดี ลักษณะของผิวเคลือบมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง การจัดเรียงตัวของอนุภาคค่อนข้างดี พบรูพรุนค่อนข้างน้อย ไม่ปรากฏรอยแยก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน แสดงการยึดเกาะเกิดระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานที่ดี (adhesion) พบอนุภาคที่ไม่หลอมในปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับอนุภาคที่หลอมได้สมบูรณ์ แต่ก็ยังพบรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณใกล้กับผิวหน้าด้านบนของผิวเคลือบ จะพบรูพรุนที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และมีจำนวนมากกว่าตรงบริเวณด้านล่างของผิวเคลือบซึ่งใกล้กับชิ้นงาน คาดว่าเนื่องจากในกระบวนการพ่นเคลือบนั้น อนุภาคของผงเคลือบที่ได้รับแรงดันจากแก๊สเคลื่อนที่มาก่อนหน้าและตกกระทบบนชิ้นงานนั้นจะถูกอัดด้วยแรงดันอย่างต่อเนื่องจากอนุภาคผงเคลือบซึ่งเคลื่อนที่ตามมา จึงทำให้อนุภาคซึ่งอยู่ด้านในใกล้กับชิ้นงานซึ่งอยู่ในสภาพแข็งกึ่งเหลวอัดกันแน่นและมีการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่อยู่ส่วนบนของผิวเคลือบจึงทำให้เกิดรูพรุนน้อยกว่า นอกจากนี้การคายความร้อนจากด้านในของผิวเคลือบออกสู่ด้านนอก และการที่ผิวด้านนอกซึ่งสัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบซึ่งอยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านนอกเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการแข็งตัว (segregation)[23] ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวเคลือบ รูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนจึงมากกว่าด้านล่าง ผิวเคลือบซึ่งอยู่ด้านบนน่าจะเกิดออกไซด์ได้ง่ายกว่าผิวที่อยู่ด้านในที่ติดกับชิ้นงาน

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่พบว่าธาตุ Al, Si และ O เป็นองค์ประกอบ ปริมาณของธาตุแสดงดังตาราง 4.14 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีในผิวเคลือบและผงเคลือบยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่เหมือนกัน และมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si รายละเอียดการวิเคราะห์ดังสเปกตรัม EDS-SEM ของการวิเคราะห์ในรูป 4.29 และ ตาราง 4.14

4.4.1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ



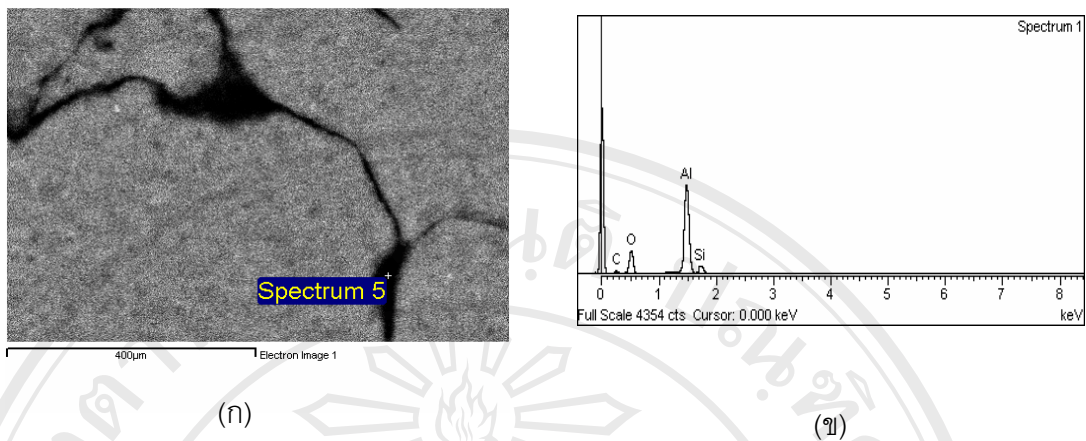
(ก)

(ข)

รูป 4.31 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบ จุดและ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.15 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	2.58	4.30
Al	84.75	83.69
Si	12.66	12.01



รูป 4.32 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

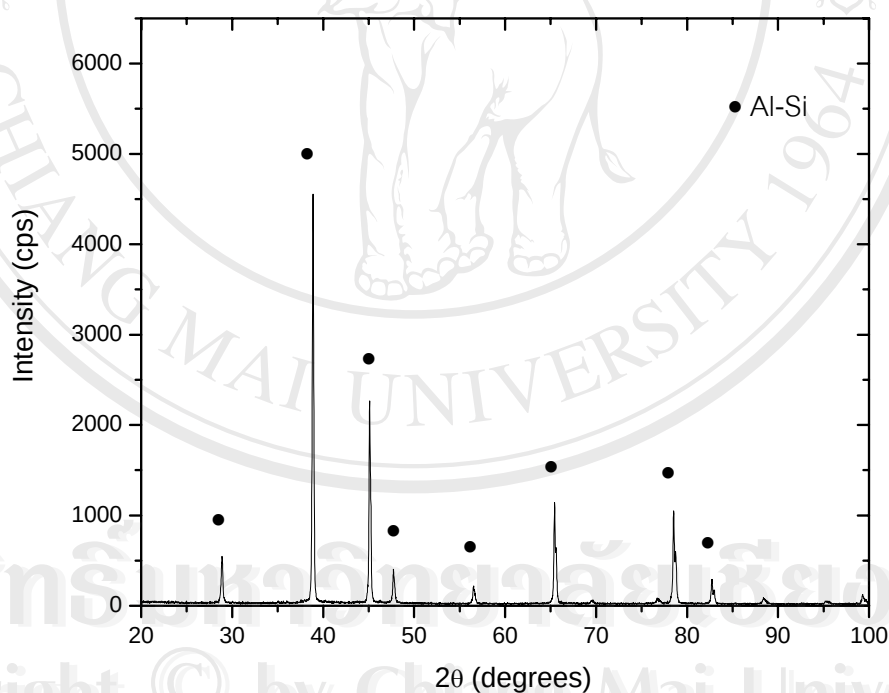
ตาราง 4.16 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	5.82	9.42
O	46.06	55.95
Al	47.54	34.24
Si	0.57	0.39

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังรูป 4.31(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.31(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ใน ตาราง 4.15 พบว่ามีธาตุ O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณของ O พบนั้นมีปริมาณที่น้อย คือร้อยละ 2.58 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุยังคงเหมือนกับผลการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งแสดงว่าบริเวณกลาง splat ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ธาตุ O ที่พบน่าจะเกิดจากออกไซด์ในกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบเสร็จแล้ว และอีกประการหนึ่งคือมาจากผงพ่นเคลือบที่นำมาพ่น เนื่องจากในการวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si ก็พบ O เป็นองค์ประกอบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlarmellar ดังรูป 4.32(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ให้ไว้ในรูป 4.32(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.16 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณกลาง splat พบว่าบริเวณ interlarmellar มีธาตุ C เป็นองค์ประกอบ ขณะที่บริเวณกลาง splat ไม่มีธาตุดังกล่าว นอกจากนี้ปริมาณของธาตุ O ยังเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 33.74 โดยน้ำหนัก แสดงว่าในกระบวนการพ่นเคลือบ เมื่อผงเคลือบได้รับความร้อนทำให้เกิดออกซิเดชันบริเวณผิวของผงเคลือบ สำหรับธาตุคาร์บอนที่พบนั้น สันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากการออกซิเดชันของแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) ในกระบวนการเผาไหม้ ในระหว่างให้ความร้อนของกระบวนการพ่นเคลือบ

4.4.1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ Al-12Si ด้วยเทคนิค XRD



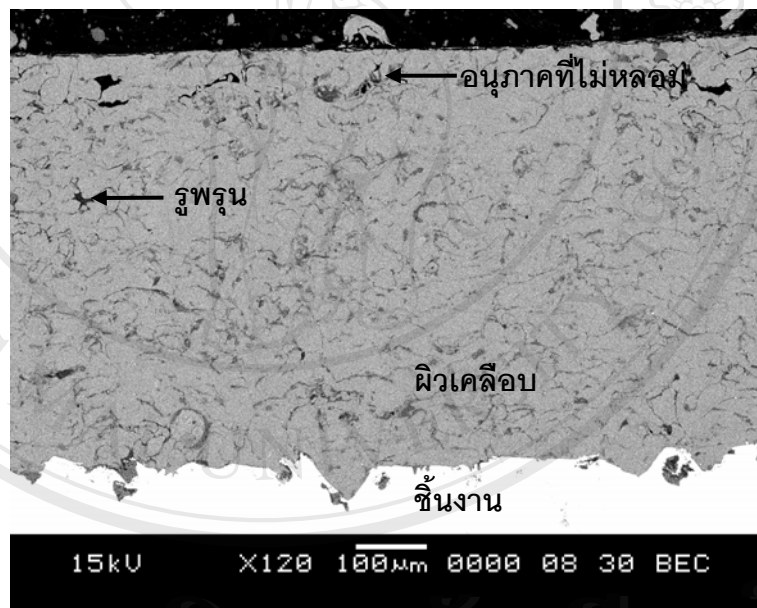
รูป 4.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si

เมื่อทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ Al-12Si ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูป 4.32 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐาน JCPDSไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะรูปทรง splat ของผิว

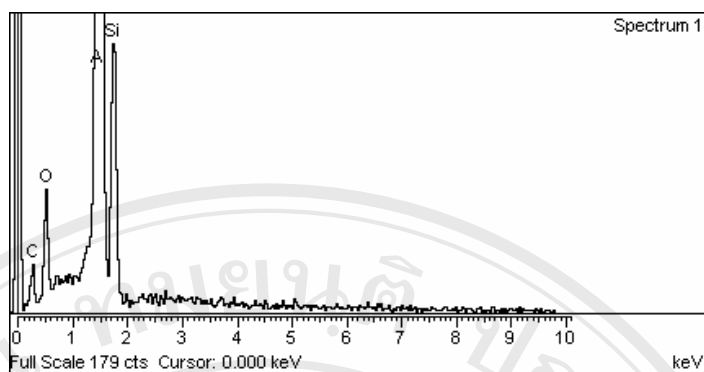
เคลือบมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งสีของอนุภาคผิวเคลือบก็มีลักษณะที่อยู่ในเฟสสีเดียวกัน ไม่พบอนุภาคแสดงลักษณะการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่ โดยพบว่าธาตุองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบยังคงเป็นธาตุชนิดเดียวกับผงเคลือบ Al-12Si คือ O, Al และ Si ถึงแม้ว่าจะตรวจพบธาตุ C ในบริเวณ interlarmellar แต่ก็มีปริมาณที่น้อย คือ ร้อยละ 5.82 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนเฟสของธาตุซึ่งอาจจะเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของ splat ได้

4.4.2 ผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

4.4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค BSE-SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM



รูป 4.34 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) กำลังขยาย 120 เท่า



รูป 4.35 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ตาราง 4.17 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	9.62	18.49
O	7.69	11.10
Al	72.65	62.16
Si	10.03	8.25

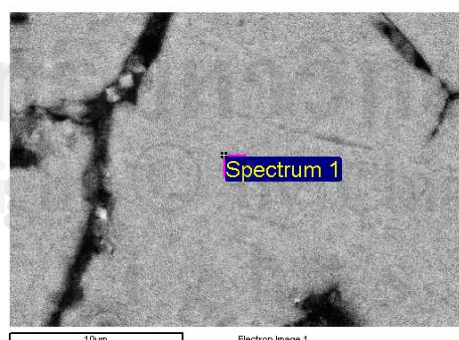
จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.34 พบว่า ผิวเคลือบที่เตรียมได้มีความหนาประมาณ $500 \mu\text{m}$ มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar โดยที่ผิวเคลือบมีการเกาะตัวกันแบบ cohesion ไม่ปรากฏรอยแยก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน ผิวหน้าของผิวเคลือบมีความเรียบดี แสดงถึงการหลอมตัวของผิวเคลือบที่มีความสม่ำเสมอ พบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ โดยที่รูพรุนที่พบด้านบนของผิวเคลือบจะมีขนาดและจำนวนมากกว่าพบที่บริเวณผิวด้านล่างที่อยู่ใกล้กับชิ้นงาน คาดว่าเนื่องจากในกระบวนการพ่นเคลือบนั้น อนุภาคของผงเคลือบที่ได้รับแรงดันจากแก๊สและเคลื่อนที่มาก่อนหน้าและตกกระทบบนชิ้นงานนั้น จะถูกอัดด้วยแรงดันอย่างต่อเนื่องจากอนุภาคผงเคลือบซึ่งเคลื่อนที่ตามมา จึงทำให้อนุภาคซึ่งอยู่ด้านในใกล้กับชิ้นงานอัดกันแน่น และมีการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่อยู่ส่วนบนของผิวเคลือบจึงทำให้เกิดรูพรุนน้อยกว่า นอกจากนี้การคายความร้อนจากด้านในของผิวเคลือบออกสู่ด้านนอก และการที่ผิวด้านนอกซึ่ง

สัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบซึ่งอยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านนอกเย็นตัวไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการแข็งตัว (segregation)[23] จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวเคลือบ รูปพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนจึงมากกว่าด้านล่าง

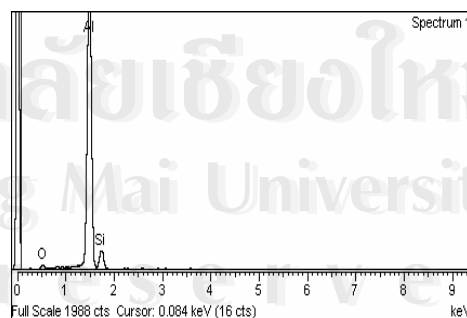
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่าผิวเคลือบ Al-12Si มีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีกว่าเล็กน้อย โดยสามารถสังเกตได้จากแนวสีดำของ interlamellar ที่ไม่ต่อเนื่องแสดงให้เห็นขนาดของ splat ไม่ชัดเจนในบางจุดมากกว่าผิวเคลือบ Al-12Si

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณร้อยละ 9.62, 7.69, 72.65 และ 10.03 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.17 และแสดงสเปกตรัม EDS-SEM ของการวิเคราะห์ในรูป 4.35 จากการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่แตกต่างกัน คือ ผิวเคลือบ ที่เติมเส้นใยนาโนลงไปร้อยละ 5 โดยน้ำหนักนั้นมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ร้อยละ 9.62 โดยน้ำหนัก และปริมาณของธาตุ Al และ Si ลดลงร้อยละ 6.29 และ 4.36 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้น ทำให้ปริมาณของธาตุทั้งสองชนิด มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวม สำหรับปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้นนั้นคาดว่ามาจากเส้นใยนาโนเอง และมาจาก C ซึ่งอยู่ในรูปของกราฟาไฟติดมากับเส้นใยนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ และคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากสารตั้งต้น สำหรับปริมาณของธาตุ O นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่มากคือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.92 โดยน้ำหนัก

4.4.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)



(ก)

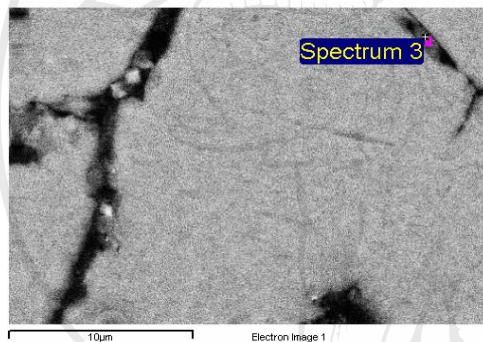


(ข)

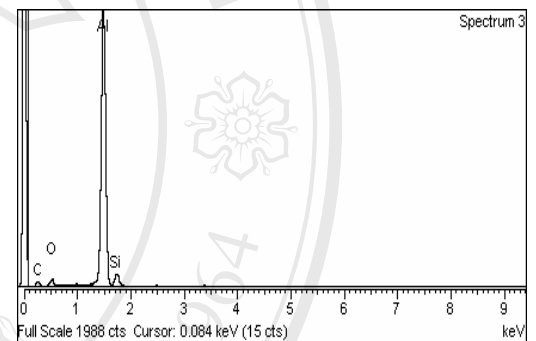
รูป 4.36 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.18 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิว Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	4.12	6.78
Al	84.84	82.86
Si	11.04	10.36



(ก)



(ข)

รูป 4.37 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)
เมื่อ(ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

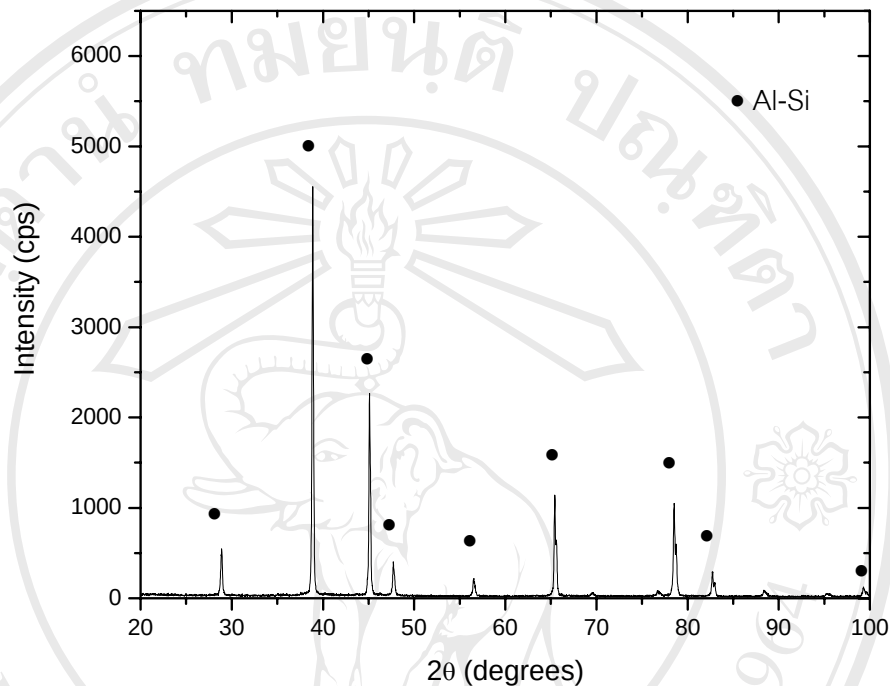
ตาราง 4.19 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	19.00	33.10
O	8.00	10.46
Al	67.51	52.35
Si	5.48	4.09

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ได้ในรูป 4.36(ข) และรายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.18 พบว่ามีธาตุ O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณของ O พบนั้นมีปริมาณที่น้อย คือร้อยละ 4.12 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุยังคงเหมือนกับผลการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งแสดงว่าบริเวณกลาง splat ไม่ได้เกิดการออกซิเดชัน แต่ธาตุ O ที่พบน่าจะเกิดจากออกไซด์ในกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบเสร็จแล้ว และอีกประการหนึ่งคือมาจากผงพ่นเคลือบที่นำมาพ่น เนื่องจากในการวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si ก็พบ O เป็นองค์ประกอบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlarmellar ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ได้ในรูป 4.37 (ข) และรายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.19 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 19.00, 8.00, 67.51 และ 5.48 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlarmellar กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si แต่ปริมาณธาตุ C และ Si ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีปริมาณของ C และ Si มากกว่าถึงร้อยละ 13.24 และ 4.91 โดยน้ำหนักตามลำดับ และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปในผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ

4.4.1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ในรูปสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

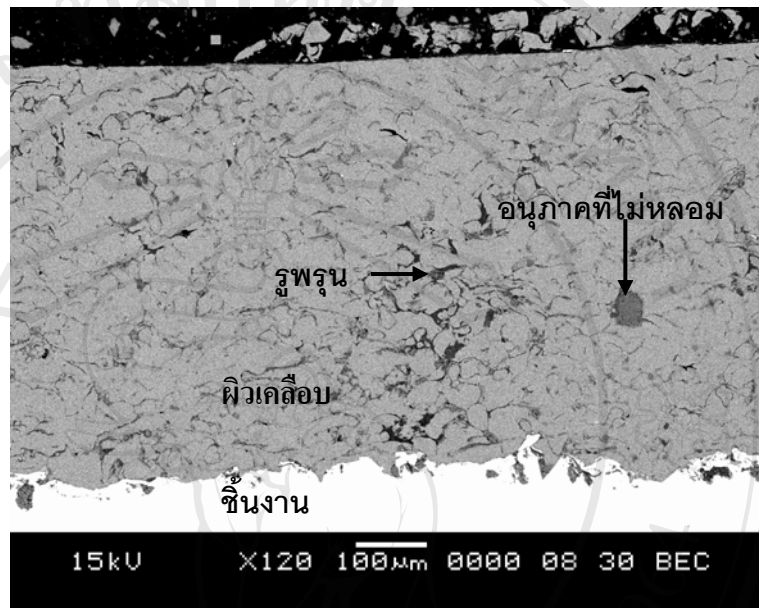


รูป 4.38 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

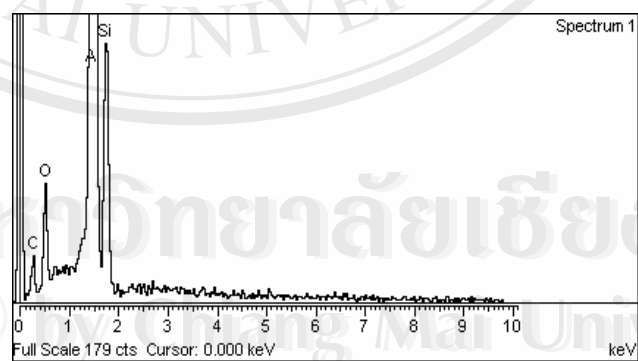
เมื่อทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.38 และเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDSไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะรูปทรง splat ของผิวเคลือบมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งสีของอนุภาคผิวเคลือบก็มีลักษณะที่อยู่ในเฟสสีเดียวกันเป็นส่วนใหญ่คือสีเทา มีแถบสีดำซึ่งเป็นลักษณะของรูพรุน แต่ก็มีจำนวนไม่มาก คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้นไม่มากพอ และมีค่าแตกต่างที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักกับผงเคลือบหลัก ดังนั้นพีคของกราฟที่พบเมื่อวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิคนี้จึงมีเพียงพีคของผงเคลือบ Al-12Si เท่านั้น

4.4.3 Al-12Si + 10(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

4.4.3.1 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิค BSE-SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่



รูป 4.39 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)
กำลังขยาย 120 เท่า



รูป 4.40 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

ตาราง 4.20 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

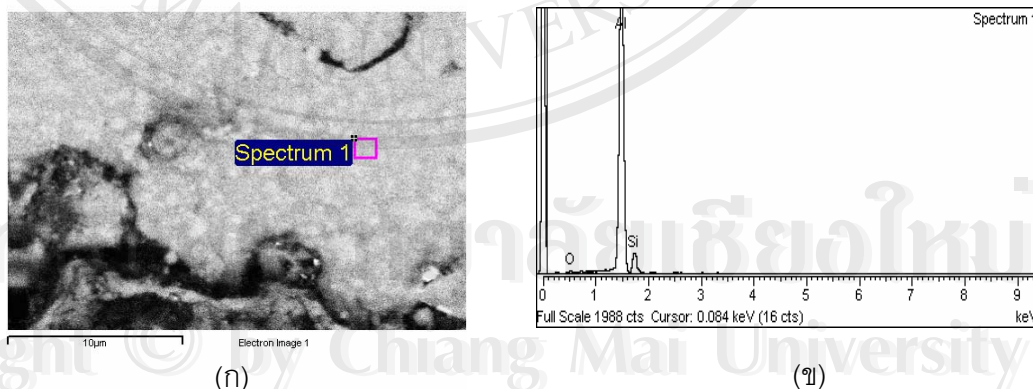
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	11.14	21.02
O	8.08	11.45
Al	71.35	59.92
Si	9.43	7.61

จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.39 พบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีความหนาประมาณ $550\mu\text{m}$ มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar เกาะกันด้วยพันธะทางกลแบบประสาน (interlocking) ไม่ปรากฏรอยแยก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน พบอนุภาคที่ไม่หลอมบางจุด โดยส่วนใหญ่ผิวหน้าของผิวเคลือบตามภาพตัดขวางมีความเรียบดี แสดงถึงการหลอมตัวของผงเคลือบที่มีความสม่ำเสมอ ไม่พบลักษณะการกลายเป็นไอซึ่งเป็นสาเหตุให้ผิวหน้ามีลักษณะคล้ายฟองน้ำ พบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ โดยที่รูพรุนที่พบบริเวณผิวด้านบนของผิวเคลือบจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีการกระจายตัวของแถบดำที่มากขึ้น คาดว่าเนื่องจากในกระบวนการพ่นเคลือบนั้น อนุภาคของผงเคลือบที่ได้รับแรงดันจากแก๊สและเคลื่อนที่มาก่อนหน้าและตกกระทบบนชิ้นงานนั้น จะถูกอัดด้วยแรงดันอย่างต่อเนื่องจากอนุภาคผงเคลือบซึ่งเคลื่อนที่ตามมา จึงทำให้อนุภาคซึ่งอยู่ด้านในใกล้กับชิ้นงานซึ่งอยู่ในสภาพแข็งกึ่งเหลวอัดกันแน่น และแข็งตัวในสภาพที่มีการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่อยู่ส่วนบนของผิวเคลือบจึงทำให้เกิดรูพรุนน้อยกว่า นอกจากนี้การคายความร้อนจากด้านในของผิวเคลือบออกสู่ด้านนอก และการที่ผิวด้านนอกสัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบที่อยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านนอกเย็นตัวไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการแข็งตัว (segregation)[23] จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวเคลือบ รูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนจึงมากกว่าด้านล่าง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วพบว่าผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักค่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีกว่า โดยสามารถสังเกตได้จากแนวสีดำของ interlamellar ของผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีขนาดที่กว้างขึ้น และพบแถบสีดำมีการกระจุกตัวเป็นกลุ่มในลักษณะของรูพรุน

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณร้อยละ 11.14, 78.08, 71.35 และ 9.43 โดยน้ำหนักตามลำดับ รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.20 และแสดงสเปกตรัม EDS - SEM ของการวิเคราะห์ในรูป 4.40 จากการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่แตกต่างกันคือ ผิวเคลือบที่เติมเส้นใยนาโนลงไปร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้นมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 11.14 wt% และปริมาณของธาตุ Al และ Si ลดลง 7.59 wt% และ 4.96 wt% ตามลำดับ คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้น ทำให้ปริมาณของธาตุทั้งสองชนิด มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวม

สำหรับปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่เตรียมได้จากการผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแล้วพบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.52 โดยน้ำหนัก จากการทดลองคาดว่าปริมาณของ C ที่เพิ่มขึ้นน่าจะมาจากเส้นใยนาโนเอง และมาจาก C ซึ่งอยู่ในรูปของกราฟาไฟต์ติดมากับเส้นใยนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ และคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากสารตั้งต้น ส่วนปริมาณของธาตุ O นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่ไม่มากคือเพิ่มขึ้น 1.41 wt% คาดว่าเกิดจากการออกซิเดชันของผิวเคลือบ

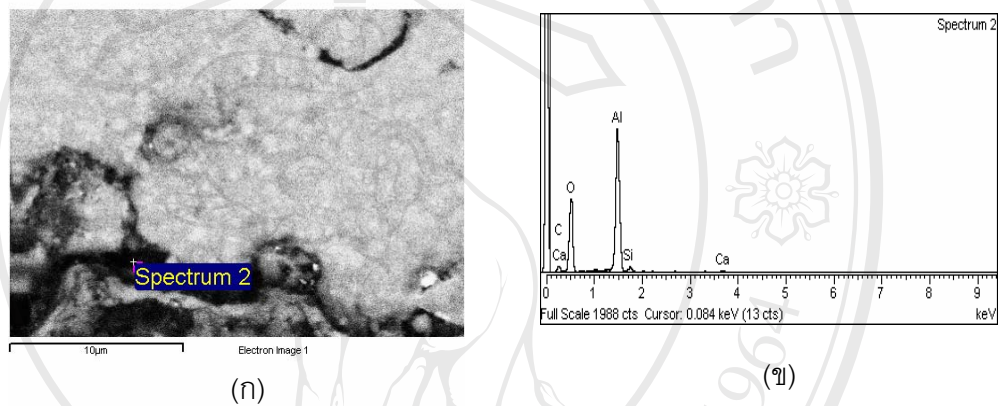
4.4.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ



รูป 4.41 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.21 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	2.04	3.40
Al	86.54	85.73
Si	11.42	10.87



รูป 4.42 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ(ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.22 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

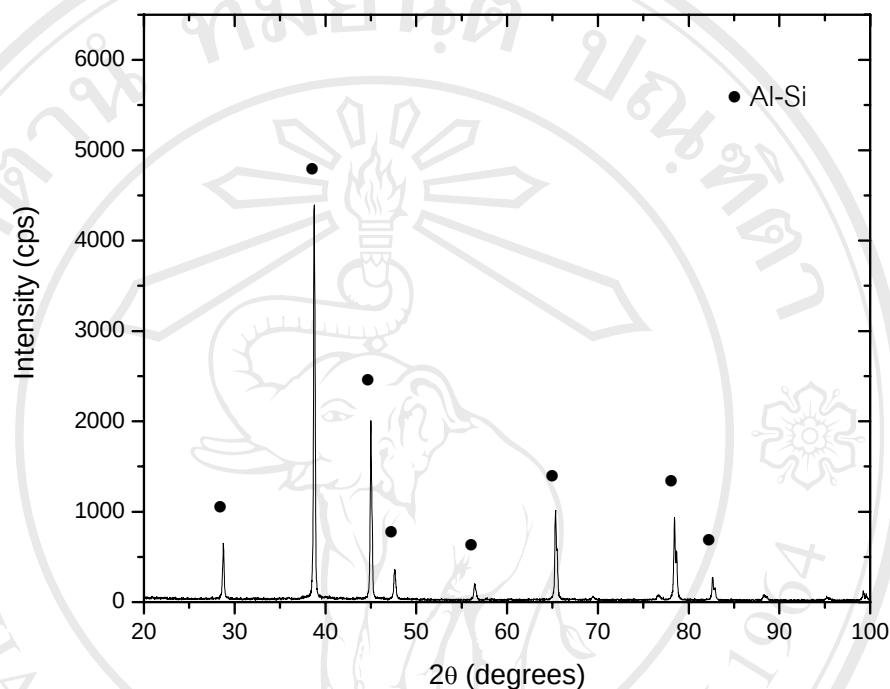
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	11.76	17.75
O	50.38	57.08
Al	35.28	23.70
Si	1.56	1.01
Ca	1.02	0.46

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.41 และรายละเอียดการวิเคราะห์ใน ตาราง 4.21 พบว่ามีธาตุ O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณของ O พบนั้นมีปริมาณที่น้อย คือร้อยละ 2.04 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุยังคงเหมือนกับผลการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งแสดงว่าบริเวณกลาง splat ไม่ได้เกิดการออกซิเดชัน แต่ธาตุ O ที่พบน่าจะเกิดจากออกไซด์ในกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบเสร็จแล้ว และอีกประการหนึ่งคือมาจากผงพ่นเคลือบที่นำมาพ่น เนื่องจากในการวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si ก็พบ O เป็นองค์ประกอบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlarmellar ดังรูป 4.42(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.42(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.22 พบว่ามีธาตุ C, O, Al, Si และ Ca เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนร้อยละ 11.76, 50.38, 35.28, 1.65 และ 1.02 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlarmellar กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si แต่ปริมาณธาตุ C และ Si ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) มีปริมาณของ C และ Si มากกว่าร้อยละ 5.94 และ 0.99 โดยน้ำหนักตามลำดับ และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปในผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ จึงทำให้ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ C และ Si มีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเพิ่มขึ้นดังกล่าว

4.4.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

รูป 4.43 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

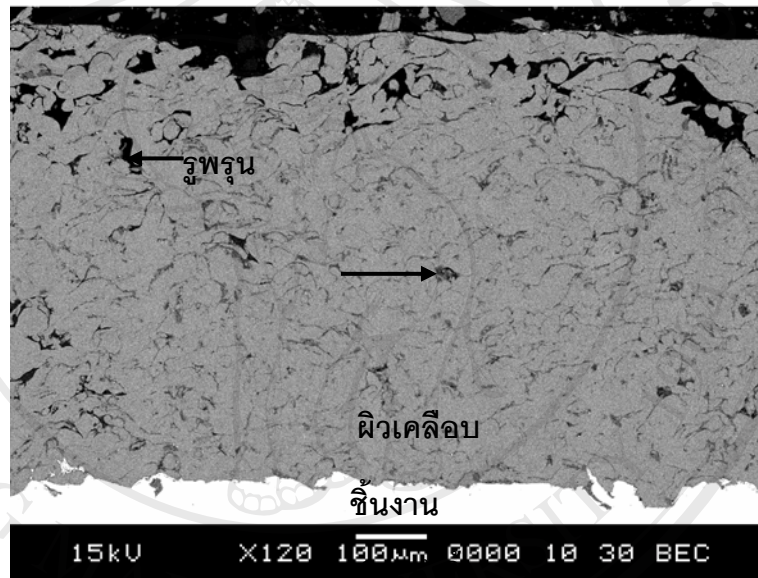


เมื่อทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD ดังรูป 4.43 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะรูปทรง splat ของผิวเคลือบมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งสีของอนุภาคผิวเคลือบก็มีลักษณะที่อยู่ในเฟสเดียวกัน และไม่พบอนุภาคแสดงลักษณะของการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบ มีแถบสีดำซึ่งเป็นลักษณะของรบกวนที่มีลักษณะอยู่เป็นกระจุก แต่ก็มีจำนวนไม่มาก คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้นไม่มากพอ และมีค่าแตกต่างที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักกับผงเคลือบหลัก ดังนั้นพีคของกราฟที่พบเมื่อวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิคนี้จึงมีเพียงพีคของผงเคลือบ Al-12Si เท่านั้น และความจริงอย่างหนึ่งของการพ่นเคลือบด้วยความร้อนคือ อนุภาคของวัสดุที่ใช้เคลือบจะถูกเร่งด้วยความเร็วสูงเข้าตกระบบชิ้นงานในลักษณะแผ่ออก ดังนั้นจะมีเส้นใยนาโนบางส่วนที่ฟุ้งกระจายและไม่ตกกระทบบที่ชิ้นงาน เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา ไม่ห่อหุ้มเหลว และไม่ใช่น้ำเชื่อมเดียวกันกับผงพ่นเคลือบ จึงทำ

ให้อัตราส่วนของเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบ เมื่อคิดเทียบร้อยละโดยน้ำหนักกับ Al-12Si แล้วเป็นอัตราส่วนที่น้อย ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบสารประปรายในรูปอื่นๆ นอกจากพบในรูปของสารประกอบ Al-12Si

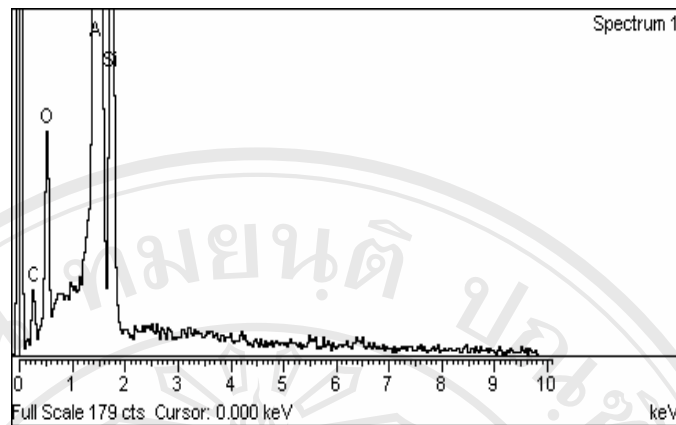
4.4.4 ผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

4.4.4.1 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค BSE-SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM



รูป 4.44 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

กำลังขยาย 120 เท่า



รูป 4.45 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นผิวของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ตาราง 4.23 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	11.16	21.04
O	8.16	11.55
Al	70.56	59.21
Si	10.16	8.19

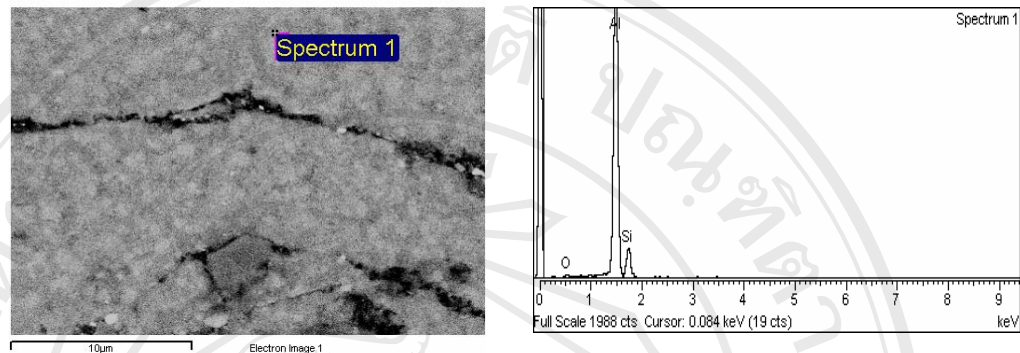
จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ $\text{Al-12S} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.44 พบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีความหนาประมาณ $600\mu\text{m}$ มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar เกาะกันด้วยพันธะทางกลแบบประสาน (interlocking) ไม่ปรากฏรอยแยก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน พบอนุภาคที่ไม่หลอมบางจุด พบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในอัตราส่วนที่น้อยกว่านี้แล้วพบว่า รูพรุนที่พบจะมีจำนวนที่มากขึ้น และขนาดที่ใหญ่ขึ้นโดยเฉพาะตรงส่วนบริเวณด้านบนของผิวเคลือบ คาดว่าเกิดจากการคายความร้อนของผิวเคลือบจากด้านบนของผิวเคลือบออกสู่ด้านบน และการที่ผิวด้านบนซึ่งสัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบซึ่งอยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านบนเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการแข็งตัว (segregation)[23] จึงทำให้เกิด

ช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวและ การที่รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นจากผลการทดลองคาดว่า เนื่องมาจากปริมาณเส้นใยนาโนได้เข้าไปแทรกอยู่ในผิวเคลือบมากขึ้น เป็นผลให้พันธะเชิงกลแบบ ประสานของผิวเคลือบลดลง โดยเฉพาะบริเวณผิวด้านบน จึงทำให้สังเกตเห็นรูพรุนที่ชัดขึ้น แต่ โดยส่วนใหญ่ผิวน้ำของผิวเคลือบตามภาพตัดขวางมีความเรียบดี แสดงถึงการหลอมตัวของผง เคลือบที่มีความสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แล้วพบว่าผิวเคลือบค่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่า โดยสามารถ สังเกตได้จากแนวสีดำของ interlamellar ของผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักมี ขนาดที่กว้างขึ้น โดยเฉพาะบริเวณส่วนด้านบนของผิวเคลือบ

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณร้อยละ 11.16, 8.16, 70.56 และ 10.16 โดยน้ำหนักตามลำดับ รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.23 และแสดงสเปกตรัม EDS-SEM ของการวิเคราะห์ใน รูป 4.45 จากการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ แตกต่างกันคือ ผิวเคลือบที่เติมเส้นใยนาโนลงไปร้อยละ 15 โดยน้ำหนักนั้นมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ร้อยละ 11.16 และปริมาณของธาตุ Al และ Si ลดลงร้อยละ 8.38 และ 4.23 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้น ทำให้ปริมาณของธาตุทั้งสอง ชนิด มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวม

สำหรับปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้นนั้นคาดว่ามาจากเส้นใยนาโนเอง และมาจาก C ซึ่งอยู่ในรูปของ กราไฟต์ติดมากับเส้นใยนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ และคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากสารตั้ง ต้น ส่วนปริมาณของธาตุ O นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง ในปริมาณที่ไม่มากคือเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.49 โดยน้ำหนัก คาดว่าเกิดจากการออกซิเดชันของผิว เคลือบ

4.4.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของ ผิวนเคลือบ



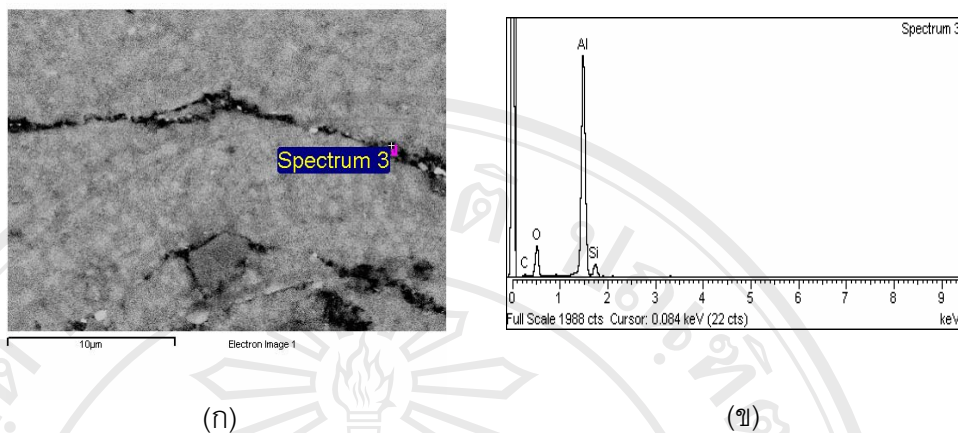
(ก)

(ข)

รูป 4.46 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.24 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
O	2.35	3.92
Al	82.51	81.68
Si	15.15	14.41



รูป 4.47 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.25 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

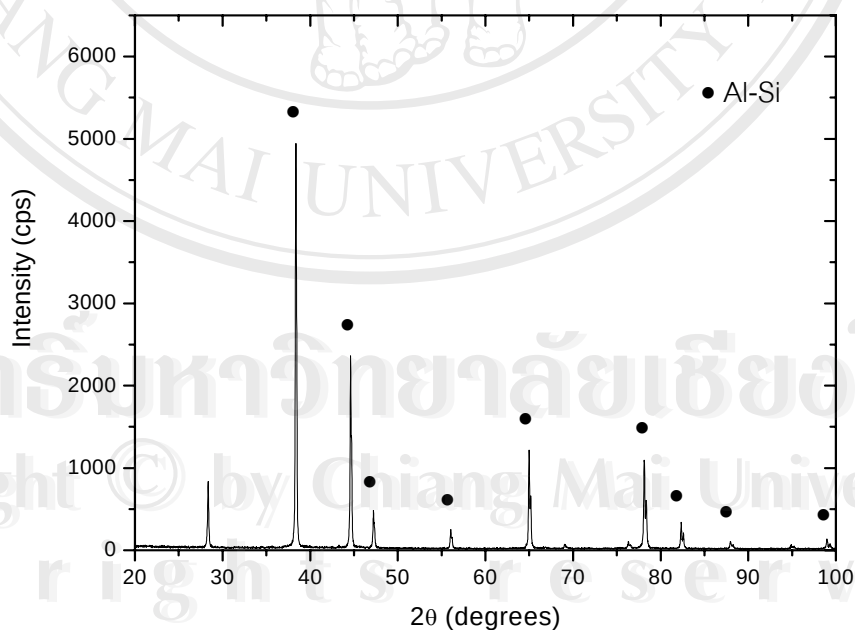
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	8.56	14.87
O	27.50	35.86
Al	57.96	44.82
Si	5.98	4.44

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.46 และรายละเอียดการวิเคราะห์ใน ตาราง 4.24 พบว่ามีธาตุ O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณของ O พบนั้นมีปริมาณที่น้อย คือร้อยละ 2.35 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุยังคงเหมือนกับผลการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งแสดงว่าบริเวณกลาง splat ไม่ได้เกิดการออกซิเดชัน แต่ธาตุ O ที่พบน่าจะเกิดจากออกไซด์ในกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบเสร็จแล้ว และอีกประการหนึ่งคือมาจากผงพ่นเคลือบที่นำมาพ่น เนื่องจากในการวิเคราะห์ผงเคลือบ

Al-12Si ก็พบ O เป็นองค์ประกอบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlarmellar ดังรูป 4.47(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ให้ไว้ในรูป 4.47(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ให้ในตาราง 4.25 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนร้อยละ 8.56, 27.50, 57.96 และ 5.98 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlarmellar กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si แต่ปริมาณธาตุ C และ Si ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) มีปริมาณของ C และ Si มากกว่าร้อยละ 2.56 และ 5.47 โดยน้ำหนักตามลำดับ และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไป ผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ

4.4.4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) ด้วยเทคนิค XRD

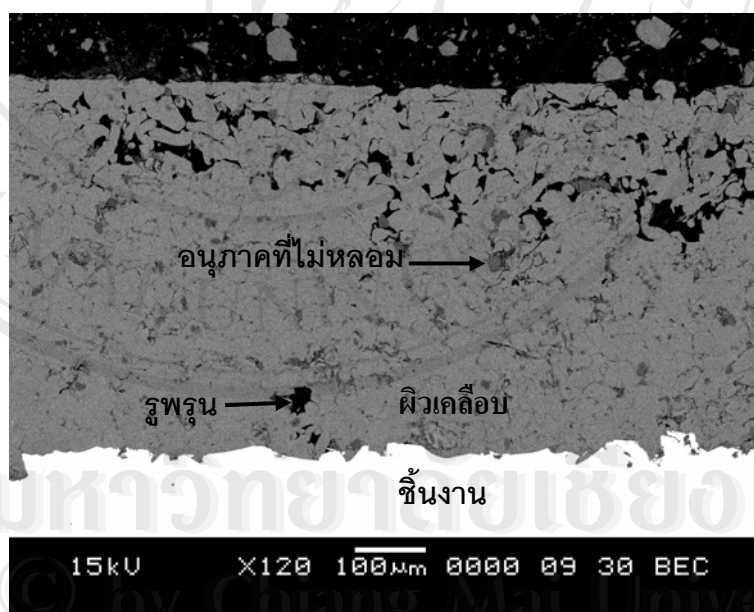


รูป 4.48 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄)

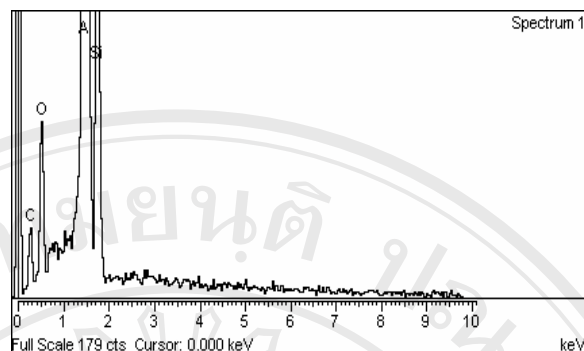
ทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.48 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะรูปทรง splat ของผิวเคลือบมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งสีของอนุภาคผิวเคลือบก็มีลักษณะที่อยู่ในเฟสเดียวกันเป็นส่วนใหญ่คือสีเทา มีแถบสีดำซึ่งเป็นลักษณะของรูพรุนที่มีลักษณะอยู่เป็นกระจุก แต่ก็มีจำนวนไม่มาก คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้นไม่มากพอ และมีค่าแตกต่างที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักกับผงเคลือบหลัก ดังนั้นพีคของกราฟที่ปรากฏเมื่อวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิคนี้จึงมีเพียงพีคของผงเคลือบ Al-12Si เท่านั้น

ผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

4.4.5.1 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค BSE – SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่



รูป 4.49 ภาพภาคตัดขวาง BSE - SEM ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ (กำลังขยาย 120 เท่า)



รูป 4.50 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ตาราง 4.26 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	11.78	22.15
O	7.59	10.71
Al	70.45	58.95
Si	10.18	8.19

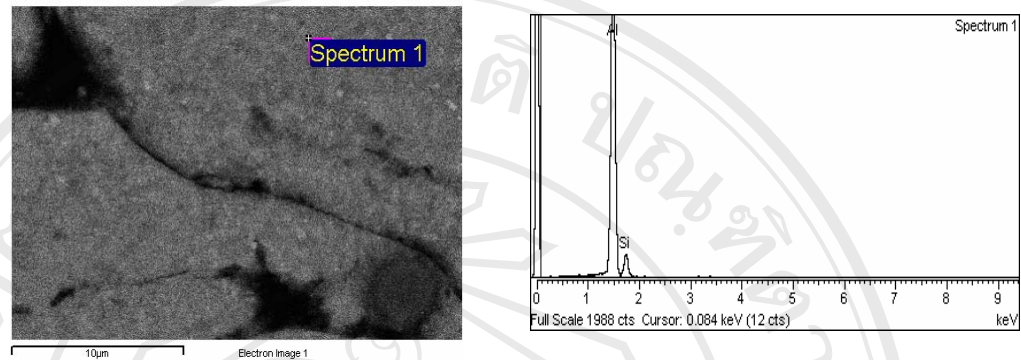
จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ $\text{Al-12S} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.49 พบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีความหนาประมาณ $600\text{ }\mu\text{m}$ มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar เกาะกันด้วยพันธะทางกลแบบประสาน สีของผิวเคลือบมีลักษณะเป็นสีเทาที่เข้มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโนในปริมาณที่น้อยกว่านี้ ไม่ปรากฏรอยแตก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน พบอนุภาคที่ไม่หลอมบางจุด นอกจากนี้ยังพบจุดกระจายอยู่ทั่วไป คาดว่าเป็นส่วนของเส้นใยนาโน พบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ โดยที่รูพรุนที่พบจะมีจำนวนที่มากขึ้น และขนาดที่ใหญ่ขึ้นตรงส่วนบริเวณด้านบนของผิวเคลือบ คาดว่าเกิดจากการคายความร้อนของผิวเคลือบจากด้านบนของผิวเคลือบออกสู่ด้านบน และการที่ผิวด้านนอกซึ่งสัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบซึ่งอยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านบนเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวเคลือบ และทำให้เกิดออกไซด์

ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแล้วพบว่าผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีกว่า โดยสามารถสังเกตได้จากแนวสีดำของ interlamellar ของผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 20 มีขนาดที่กว้างขึ้น โดยเฉพาะบริเวณส่วนด้านบนของผิวเคลือบ พบรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น คาดว่าเนื่องจาก ฟลักซ์ของอนุภาคพื้นเคลือบซึ่งประกอบด้วยเส้นใยนาโน และผงพื้นเคลือบ มีความเร็ว และขนาดที่แตกต่างกัน การพุ่งออกจากพื้นเคลือบ และมีการชนกันระหว่างอนุภาคทั้งสองนั้น ทำให้ splat ที่ตกกระทบผิวเคลือบมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ บางส่วนขาดหายไปจากภาพจะเห็นว่าแถบสีดำของ lamellar ไม่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแสดงขอบเขตของ splat ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณที่น้อยกว่านี้

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณร้อยละ 11.78, 7.59, 70.45 และ 10.18 โดยน้ำหนักตามลำดับ รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.26 และแสดงสเปกตรัม EDS - SEM ของการวิเคราะห์ในรูป 4.50 จากการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่แตกต่างกันคือ ผิวเคลือบ ที่เติมเส้นใยนาโนลงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้นมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 11.78 wt% และปริมาณของธาตุ Al และ Si ลดลง 8.49 wt% และ 4.21 wt% ตามลำดับ คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้น ทำให้ปริมาณของธาตุทั้งสองชนิด มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวม

สำหรับปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้นนั้นคาดว่ามาจากเส้นใยนาโนเอง และมาจาก C ซึ่งอยู่ในรูปของกราฟาइटติดมากับเส้นใยนาโนในกระบวนการสังเคราะห์และคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากสารตั้งต้น สำหรับปริมาณของธาตุ O นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่ไม่มากคือเพิ่มขึ้น 0.92 wt% คาดว่าเกิดจากการออกซิเดชันของผิวเคลือบ

4.4.5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของ ผิวนเคลือบ



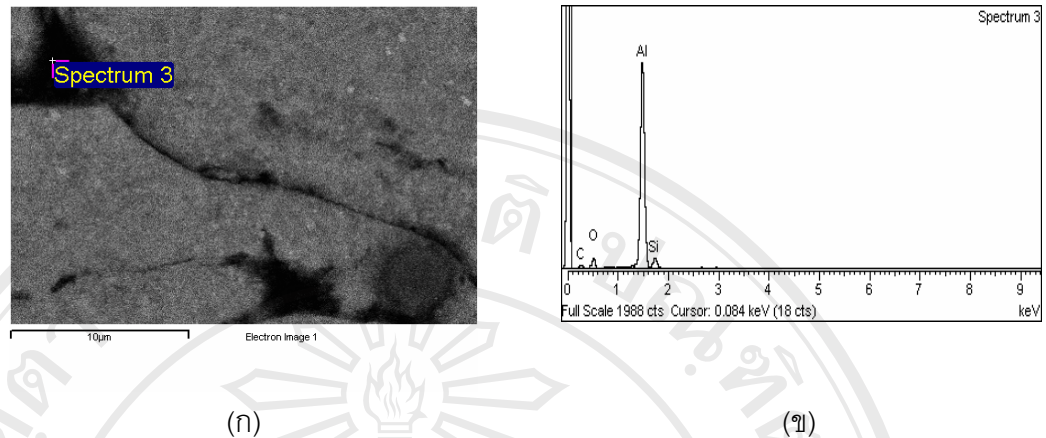
(ก)

(ข)

รูป 4.51 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.27 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
Al	87.72	88.14
Si	12.28	11.86



รูป 4.52 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

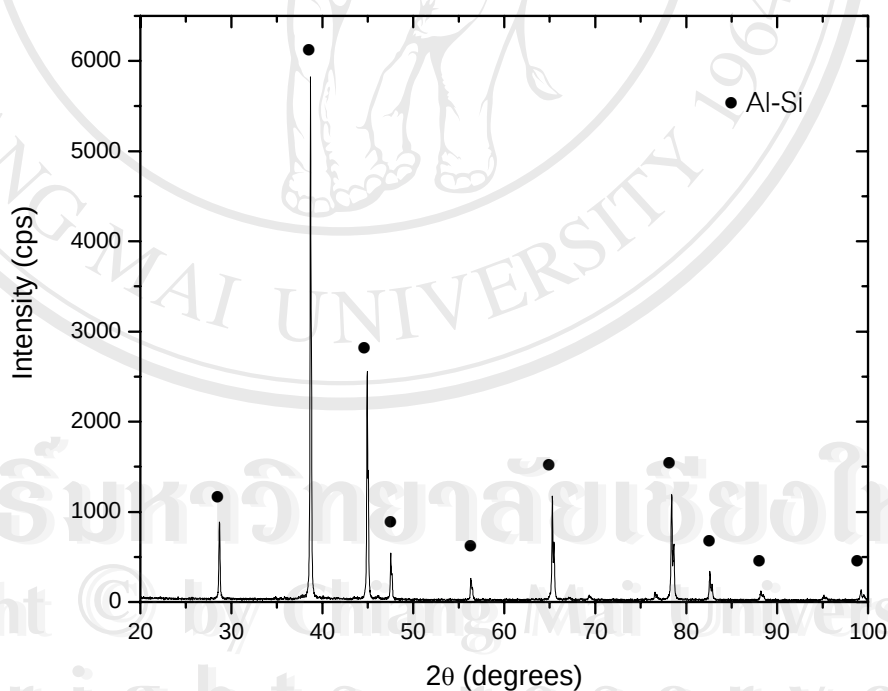
ตาราง 4.28 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	15.09	26.61
O	12.86	17.02
Al	65.97	51.78
Si	6.08	4.58

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.51 และรายละเอียดการวิเคราะห์ใน ตาราง 4.27 พบว่ามีธาตุ Al และ Si เป็นองค์ประกอบ แต่ไม่พบมี O เป็นองค์ประกอบทางเคมี แสดงว่าไม่มีการเกิด ออกไซด์ชั้นบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ จึงทำให้เชื่อมั่นได้ว่า การเกิดออกไซด์จะเกิดที่บริเวณผิวของผงเคลือบ และทำให้เชื่อมั่นว่า O ที่พบบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบอื่นๆที่กล่าวมานั้น มาจากกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบแล้วเสร็จ และอีกประการหนึ่งคือมาจากผงเคลือบที่นำมาพ่น เนื่องจากในการวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si ก็พบ O เป็นองค์ประกอบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlarmellar ดังรูป 4.52(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ให้ไว้ในรูป 4.52(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ให้ในตาราง 4.28 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบในปริมาณร้อยละ 15.09, 12.86, 65.97 และ 6.08 โดยน้ำหนักตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlarmellar กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si แต่ปริมาณธาตุ C และ Si ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีปริมาณของ C และ Si มากกว่าร้อยละ 9.27 และ 5.51 โดยน้ำหนักตามลำดับ และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปในผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ

4.4.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD

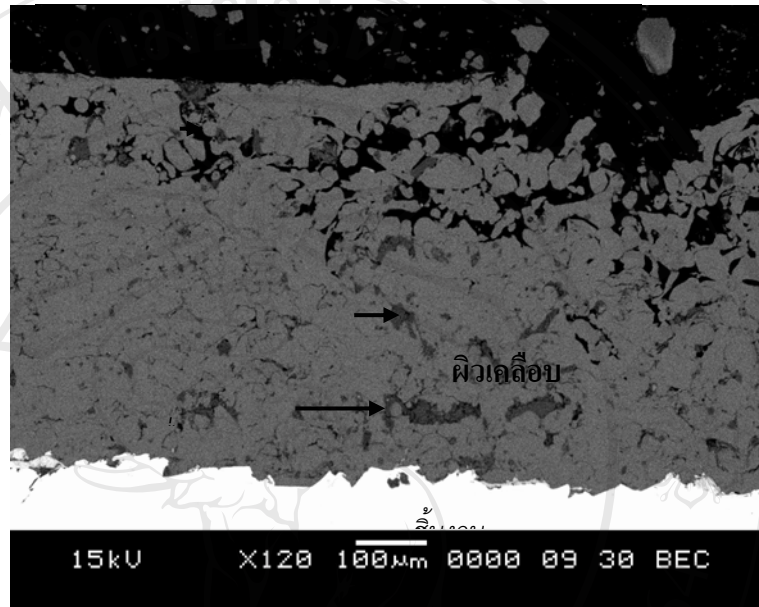


รูป 4.53 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

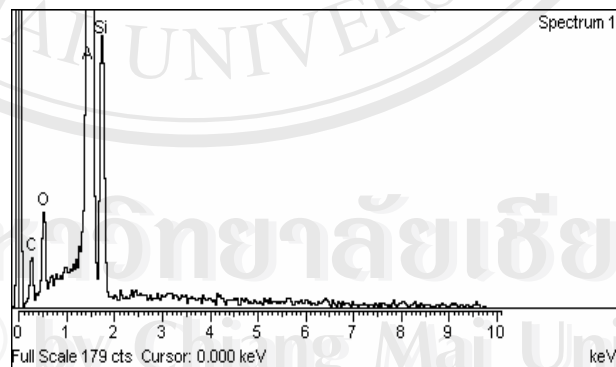
เมื่อทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูป 4.53 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะของผิวเคลือบรวมทั้งการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM นั้นพบว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปนั้นคาดว่าจะเข้าไปแทรกอยู่ในบริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ สันนิษฐานว่าอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบน่าจะลดลงเมื่อเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยนาโนที่อยู่ในสภาพผสมก่อนการพ่นเคลือบ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่จะทำให้อัตราส่วนของผงผสมมีการเปลี่ยนแปลงขณะพ่นเคลือบ เช่น น้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใยนาโนกับผงเคลือบ Al-12Si การอยู่ในสถานะของแข็งของเส้นใยนาโน ความเร็วของอนุภาคขณะพุ่งกระทบชิ้นงาน การพุ่งกระจาย และสูญหายเนื่องจากแรงดันแก๊สขณะพ่นเคลือบนั้นมีมาก และเมื่อเปรียบพื้นที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบต่อพื้นที่ทั้งหมดแล้วยังเป็นอัตราส่วนที่น้อย คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้นไม่มากพอ และมีค่าแตกต่างที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักกับผงเคลือบหลัก ดังนั้นพีกของกราฟที่พบเมื่อวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิคนี้จึงพบเพียงพีกของผงเคลือบ Al-12Si เท่านั้น

4.4.6 ผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

4.4.6.1 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิค BSE – SEM และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่



รูป 4.54 ภาพ BSE-SEMของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ (กำลังขยาย 120 เท่า)



รูป 4.55 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวนเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ตาราง 4.29 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	13.96	25.76
O	6.88	9.54
Al	68.87	56.58
Si	10.29	8.12

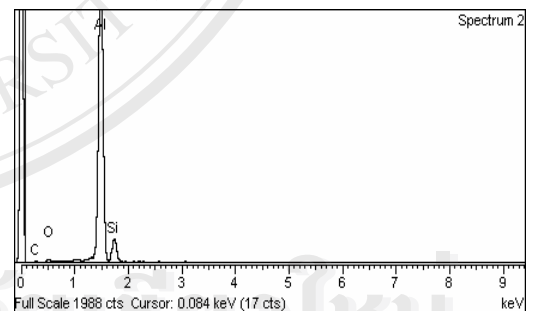
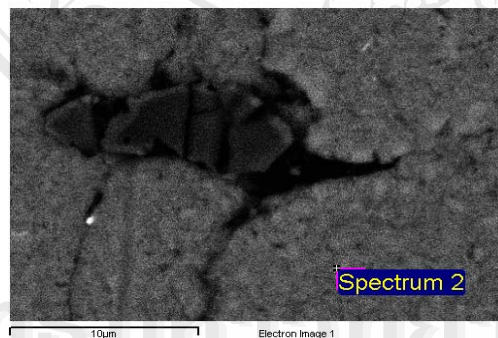
จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค BSE-SEM ดังรูป 4.54 พบว่าผิวเคลือบที่ได้มีความหนาประมาณ $500\mu\text{m}$ มีโครงสร้างของผิวเคลือบเป็นแบบ lamellar เกาะกันด้วยพันธะทางกลแบบประสาน สีของผิวเคลือบมีลักษณะเป็นสีเทาเข้มมากกว่าทุกผิวเคลือบดังกล่าวที่ผ่านมา ไม่ปรากฏรอยแยก (cracking) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน พบอนุภาคที่ไม่หลอมบางจุด พบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ โดยที่รูพรุนที่พบจะมีจำนวนที่มากขึ้น และขนาดที่ใหญ่ขึ้นตรงส่วนบริเวณด้านบนของผิวเคลือบ คาดว่าเกิดจากการคายความร้อนของผิวเคลือบจากด้านในของผิวเคลือบออกสู่ด้านนอก และการที่ผิวด้านนอกซึ่งสัมผัสกับอากาศ ทำให้ผิวเคลือบซึ่งอยู่ใกล้กับบรรยากาศด้านนอกเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการแข็งตัว จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณเกรนของผิวเคลือบทางด้านบนมากกว่าด้านล่าง และอีกประการหนึ่งคาดว่าเกิดจากการที่การมีเส้นใยนาโนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับผิวเคลือบจำนวนที่มากขึ้น และเข้าไปแทรกอยู่บริเวณขอบเกรนของอนุภาค ทำให้เกิดรูพรุน เป็นผลให้ดักรัพันธะเชิงกลแบบประสานลดลง และทำให้โครงสร้างของผิวเคลือบไม่แข็งแรง ไม่ทนต่อแรงที่มากกระทำ ดังรูป 4.53 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแล้วพบว่าผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 20 ก่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีกว่า โดยสามารถสังเกตได้จากรูพรุนของผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักมีขนาดกว้างกว่า จากภาพ 4.54 จะเห็นว่าแถบสีดำของ lamellar ไม่เป็นระเบียบ และไม่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแสดงขอบเขตของ splat ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณที่น้อยกว่านี้ คาดว่าเนื่องจาก พลั๊กซ์ของอนุภาคพื้นเคลือบซึ่งประกอบด้วยเส้นใยนาโน และผงพื้นเคลือบ มีความเร็ว และขนาดที่แตกต่างกัน การพุ่งออกจากปืนพ่นเคลือบ และมีการชนกันระหว่างอนุภาคทั้งสองนั้น ทำให้ splat ที่ตกกระทบผิวเคลือบมี

ลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ บางส่วนขาดหายไป

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่พบว่า มีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณร้อยละ 13.93, 6.88, 68.87 และ 10.29 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.29 และแสดงสเปกตรัม EDS - SEM ของการวิเคราะห์ในรูป 4.55 จากการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่แตกต่างกันคือ ผิวเคลือบ ที่เติมเส้นใยนาโนลงไปร้อยละ 25 โดยน้ำหนักนั้นมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 13.96 wt% และปริมาณของธาตุ Al และ Si ลดลง 9.07 wt% และ 4.10 wt% ตามลำดับ คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้น ทำให้ปริมาณของธาตุทั้งสองชนิด มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวม

สำหรับปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้นนั้นคาดว่ามาจากเส้นใยนาโนเอง และมาจาก C ซึ่งอยู่ในรูปของกราฟาไฟต์ติดมากับเส้นใยนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ และคัดแยกเส้นใยนาโนออกจากสารตั้งต้น ปริมาณของธาตุ O นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่ไม่มากคือเพิ่มขึ้น 0.21 wt% คาดว่าเกิดจากการออกซิเดชันของผิวเคลือบ

4.4.6.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat และ บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ



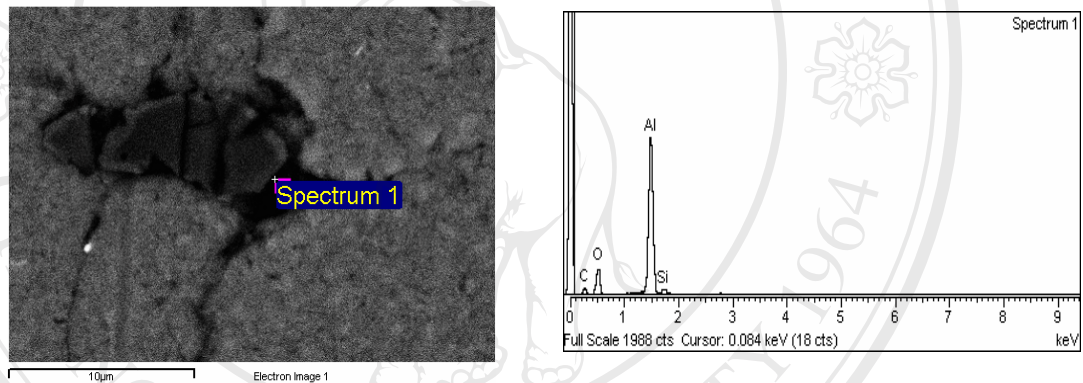
ก)

ข)

รูป 4.56 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) เมื่อ
(ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

ตาราง 4.30 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12S} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	7.93	16.03
O	2.42	3.69
Al	77.93	70.15
Si	11.72	10.14



ก)

ข)

รูป 4.57 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$
เมื่อ (ก) บริเวณการวิเคราะห์แบบจุด และ (ข) สเปกตรัมการวิเคราะห์

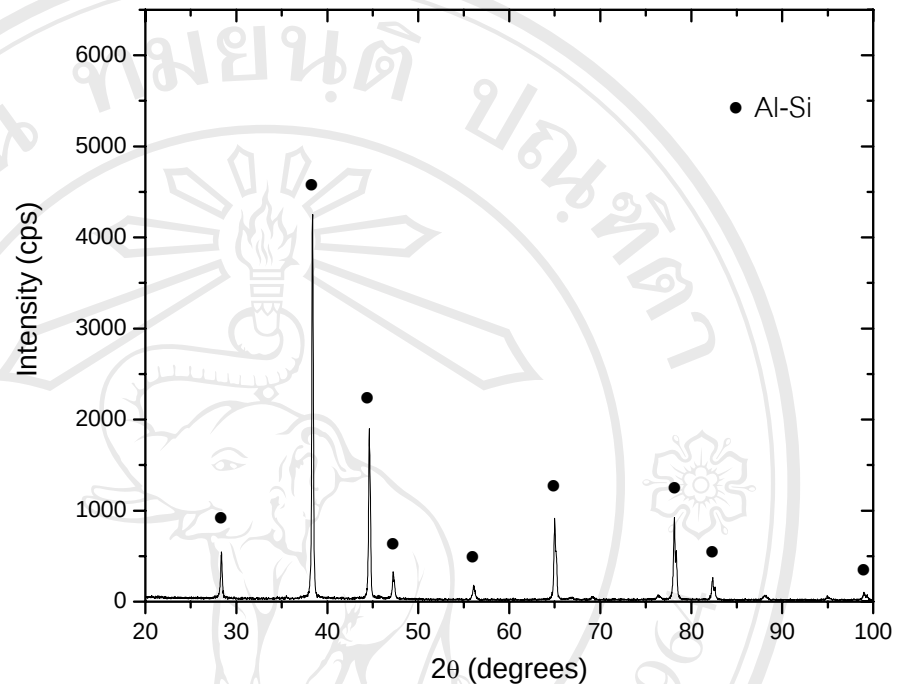
ตาราง 4.31 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12S} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละโดยอะตอม (at%)
C	19.19	29.79
O	29.97	35.02
Al	48.40	33.53
Si	2.49	1.66

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.56(ก) แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ดังรูป 4.56(ข) และรายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.30 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบ และตรวจพบธาตุ C ในปริมาณร้อยละ 7.93 โดยน้ำหนัก คาดว่า C ในจุดที่พบน่าจะมาจากกระบวนการเตรียมผิวเคลือบโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และผงขัดอะลูมินา ทำให้ผิวเคลือบซึ่งมี C เป็นองค์ประกอบหลุดออกมาจากบริเวณที่เป็นรูพรุน และบริเวณ interlamellar กระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ ซึ่งจากภาพ 4.54 จะเห็นว่าผิวหน้าของผิวเคลือบมีลักษณะสีเทาเข้มกระจายอยู่ทั่วไป และคาดว่าไม่มีการเกิด ออกซิเดชันบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ การเกิดออกซิเดชันจะเกิดที่บริเวณผิวของผงเคลือบ ดังเหตุผลที่เคยกล่าวไว้สำหรับอธิบายในผิวเคลือบอื่นๆ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี บริเวณ interlamellar ดังรูป 4.57(ก) และแสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ไว้ในรูป 4.57(ข) รายละเอียดการวิเคราะห์ในตาราง 4.31 พบว่ามีธาตุ C, O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบร้อยละ 19.19, 29.97, 48.40, 2.49 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlamellar กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si แต่ปริมาณธาตุ C และ Si ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีปริมาณของ C และ Si มากกว่า 13.37 wt% และ 1.92 wt% ตามลำดับ และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปในผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ

4.4.6.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD



รูป 4.58 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$

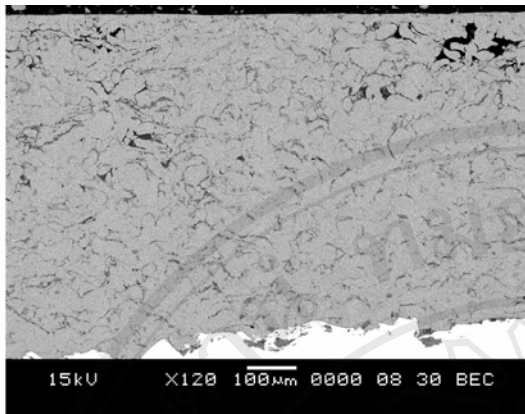
เมื่อทำการวิเคราะห์หาสารประกอบของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ด้วยเทคนิค XRD รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูป 4.58 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ไฟล์หมายเลข 41-1222 (ภาคผนวก ง รูป ง.7) พบองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของสารประกอบ Al-Si เท่านั้น จากลักษณะของผิวเคลือบรวมทั้งการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-SEM นั้นพบว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปนั้นคาดว่าจะเข้าไปแทรกอยู่ในบริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบน่าจะลดลงเมื่อเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยนาโนที่อยู่ในสภาพผสมก่อนการพ่นเคลือบ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่าง ที่จะทำให้อัตราส่วนของผสมมีการเปลี่ยนแปลงขณะพ่นเคลือบ เช่น

น้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใยนาโนกับผงเคลือบ Al-12Si การอยู่ในสถานะของแข็งของเส้นใยนาโน ความเร็วของอนุภาคขณะพุ่งกระทบชิ้นงาน การพุ่งกระจาย และสูญหายเนื่องจากแรงดัน แก๊สขณะพ่นเคลือบนั้นมีมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบต่อพื้นที่ทั้งหมดแล้วยังเป็นอัตราส่วนที่น้อย คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบนั้นไม่มากพอ และมีค่าแตกต่างที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักกับผงเคลือบหลัก ดังนั้นพีคของกราฟที่พบเมื่อวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิคนี้จึงมีเพียงพีคของผงเคลือบ Al-12Si เท่านั้น

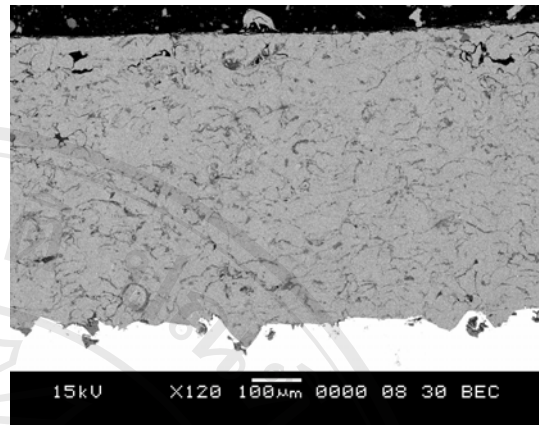
4.4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ

การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ จากภาพ BSE-SEM รูป 4.59 พบว่าผิวเคลือบที่เตรียมได้มีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 550 - 600 μm พบรูพรุนกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความพรุนของผิวเคลือบ คือ อัตราส่วนความพรุนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน ซึ่งผิวเคลือบ Al-12Si มีความพรุนน้อยที่สุด แถบสีดำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น การกระจายตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C ในปริมาณที่มากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณด้านบนของผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนักนั้นมีความพรุนมากที่สุด

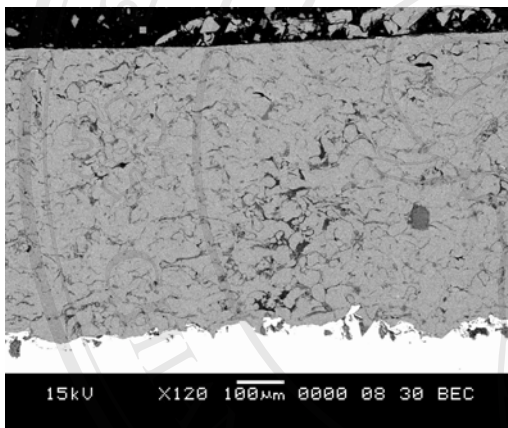
การยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน (adhesion) จากรูป 4.59 ภาพ BSE-SEM จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ผิวเคลือบ Al-12Si และผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักนั้น พบว่ามีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานที่ดี ไม่พบรอยแยก (crack) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน แต่ผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนักนั้น พบว่าสามารถสังเกตเห็นมีรอยแยกระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานขึ้น และผิวเคลือบค่อนข้างมีความหนาแน่นน้อยเมื่อเทียบกับผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในอัตราส่วนที่น้อยกว่านี้



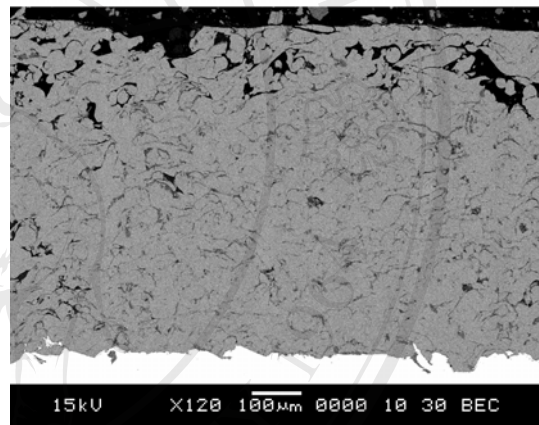
(ก) ผิวเคลือบ Al -12Si



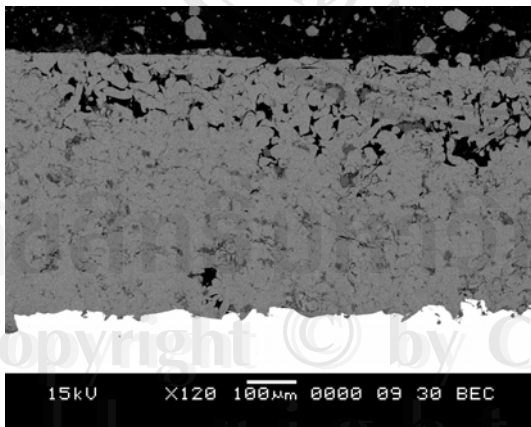
(ข) ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน 5wt%



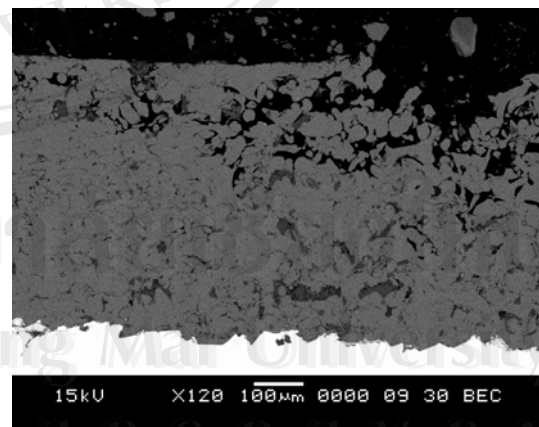
(ค) ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน 10wt%



(ง) ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน 10wt%



(จ) ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน 20wt%



(ฉ) ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโน 25wt%

รูป 4.59 (ก)-(ฉ) ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณต่างๆ (กำลังขยาย 120 เท่า)

4.4.8 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ และเปรียบเทียบธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมี รวมทั้งเปรียบเทียบปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุซึ่งพบในผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบ Al-12Si มีธาตุเป็นองค์ประกอบทางเคมีคือ O, Al และ Si และผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนทุกปริมาณมีธาตุองค์ประกอบทางเคมีดังนี้คือ C, O, Al และ Si เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโน กับผิวเคลือบ Al-12Si แล้วพบว่าผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนทุกปริมาณการผสมมีธาตุ C เป็นองค์ประกอบทางเคมี ขณะที่ผิวเคลือบ Al-12Si ไม่ปรากฏพบธาตุดังกล่าว ปริมาณของธาตุ C ที่พบนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.32 และ แสดงค่าแนวโน้มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ดังรูป 4.60

การตรวจพบธาตุ C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโนของผิวเคลือบดังกล่าวอธิบายได้ว่า เนื่องจากธาตุ C นั้นเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ แต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si ดังนั้นผิวเคลือบซึ่งเตรียมจากผงเคลือบผสมเส้นใยนาโนจึงตรวจพบธาตุดังกล่าว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบ และคาดว่าเส้นใยนาโนได้เข้าไปแทรกอยู่ในผิวเคลือบในกระบวนการพ่นเคลือบ

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ O, Al และ Si ซึ่งตรวจพบในผิวเคลือบ Al-12Si กับผิวเคลือบซึ่งเตรียมได้จากผงที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุทั้งสามชนิดในผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนทุกปริมาณการผสม มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักที่น้อยกว่าผิวเคลือบ Al-12Si ดังแสดงตาราง 4.32 ซึ่งคาดว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนลงในผิวเคลือบนั้นทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ O, Al และ Si ลดลง เนื่องจากผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนนั้นมีธาตุ C เป็นองค์ประกอบทางเคมี ขณะที่ผิวเคลือบ Al-12Si ไม่มีธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบทางเคมี จึงทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ O, Al และ Si ในผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนลดลงเมื่อคิดเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักรวมจากธาตุทั้งหมด คือ C, O, Al และ Si

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุเฉพาะในส่วน of ผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบ ทำให้แนวโน้มธาตุ Al ในผิวเคลือบมีปริมาณลดลงในขณะที่ปริมาณของ Si มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.32 และรูป 4.60 คาดว่าเนื่องจาก Al นั้นเป็นธาตุที่มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักมากที่สุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับธาตุ O และ Si ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนจึงทำให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ Al เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น คือ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ Si นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยกเว้นผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้นกลับพบว่ามีค่าลดลงดังแสดงในตาราง 4.32 คาดว่าเกิดจากการที่เราไม่สามารถควบคุมปริมาณของ O ได้ และ Si เป็นธาตุองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณน้อยที่สุดในผงพ่นเคลือบ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ O ซึ่งไม่เป็นไปในลักษณะเชิงเส้นนั้นน่าจะมีผลต่อค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอัตราร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ Si ในผิวเคลือบเช่นกัน แต่ไม่มีผลต่อค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุ Al ส่วนธาตุ C มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มเส้นใยนาโน ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ดังแสดงในตาราง 4.33 พบว่าส่วนใหญ่แล้วมีธาตุ O, Al และ Si เป็นองค์ประกอบทางเคมี ยกเว้นผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ซึ่งตรวจพบธาตุ C เป็นองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณของ O พบนั้นมีปริมาณค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักรวม องค์ประกอบทางเคมีของธาตุยังคงเหมือนกับผลการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผงเคลือบ Al-12Si ซึ่งแสดงว่าบริเวณกลาง splat ไม่ได้เกิดการออกซิเดชัน แต่ธาตุ O ที่พบน่าจะเกิดจากการออกไซด์ในกระบวนการเตรียมผิวเคลือบซึ่งต้องสัมผัสกับความชื้นและน้ำหลังการพ่นเคลือบเสร็จแล้ว สำหรับ C ที่พบบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ สันนิษฐานว่าจุดที่พบน่าจะมาจากกระบวนการเตรียมผิวเคลือบโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และผงขัดอะลูมินา ทำให้สารซึ่งมี C เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลุดออกมาจากบริเวณที่เป็นรูพรุน และบริเวณ interlamellar และกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวเคลือบ

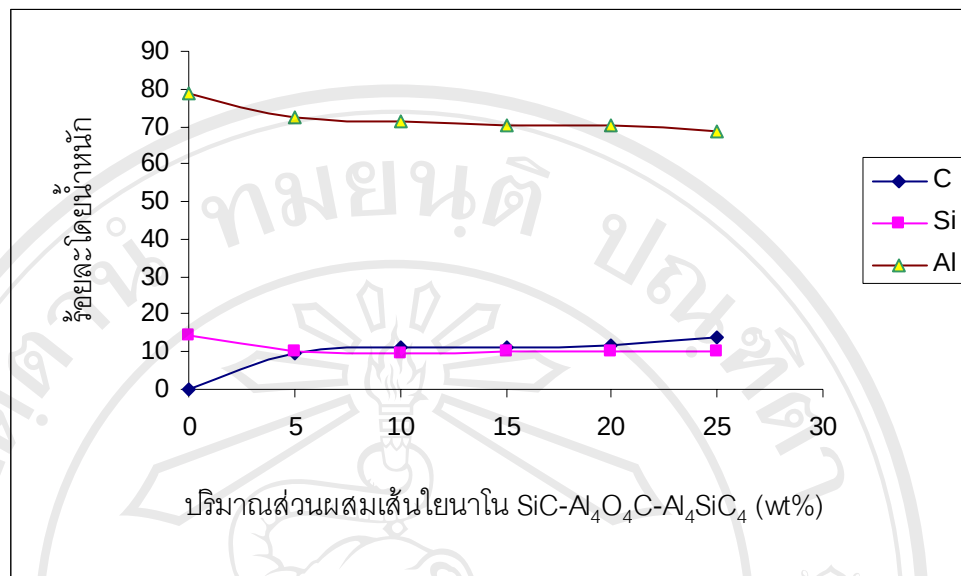
วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ดังแสดงในตาราง 4.34 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่พบในบริเวณ interlamellar ระหว่างผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ กับผิวเคลือบ Al-12Si พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุชนิดเดียวกัน คือประกอบด้วย C, O, Al และ Si ยกเว้นผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ซึ่งจุดที่ทำการวิเคราะห์พบธาตุ Ca เป็นองค์ประกอบทางเคมี

ปริมาณธาตุ C และ Si ที่พบในบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบซึ่งผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ นั้นมีปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่พบในผิวเคลือบ Al-12Si ทุกผิวเคลือบที่ทำการสุ่มวิเคราะห์ดังแสดงในตาราง 4.34 และกราฟแสดงค่าแนวโน้มปริมาณของธาตุดังรูป 4.62 เนื่องจากธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณปริมาณของธาตุทั้งสองเปลี่ยนไปในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปในผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ สำหรับธาตุ Ca ซึ่งตรวจพบในผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ นั้นคาดว่ามาจากการปนเปื้อนมากกว่าที่จะเป็นองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ เนื่องจากตรวจพบในปริมาณที่น้อย และไม่พบว่าธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนหรือผงเคลือบแต่อย่างใด

ตาราง 4.32 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{Si}$ ปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่

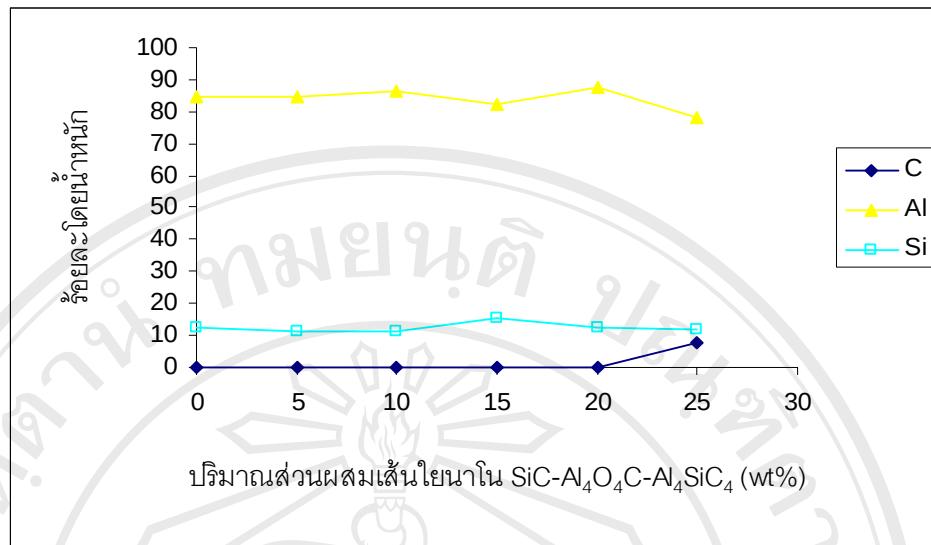
ผิวเคลือบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)				ร้อยละโดยอะตอม (at%)			
	C	O	Al	Si	C	O	Al	Si
ไม่ผสม	ND	6.67	78.94	14.39	ND	10.82	75.89	13.29
5 (wt%)	9.62	7.69	72.65	10.03	18.49	11.10	62.16	8.25
10 (wt%)	11.14	8.08	71.35	9.43	21.02	11.45	59.92	7.61
15 (wt%)	11.16	8.16	70.56	10.16	21.04	11.55	59.21	8.19
20 (wt%)	11.78	7.59	70.45	10.18	22.15	10.71	58.95	8.19
25 (wt%)	13.96	6.88	68.87	10.29	25.76	9.54	56.58	8.12



รูป 4.60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของ คาร์บอน ซิลิกอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่

ตาราง 4.33 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด

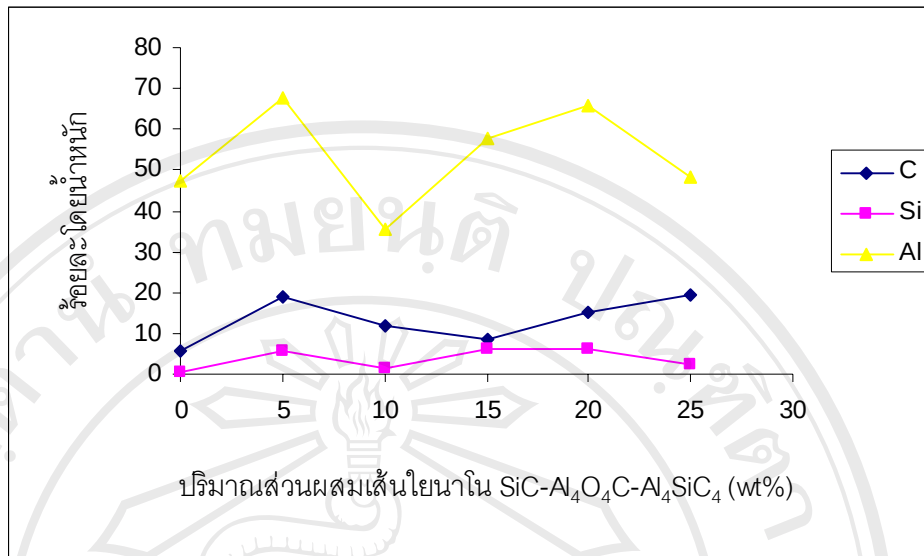
ผิวเคลือบ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)			
	C	O	Al	Si
ไม่ผสม	ND	2.58	84.75	12.66
5(wt%)	ND	4.12	84.84	11.04
10(wt%)	ND	2.04	86.54	11.42
15(wt%)	ND	2.35	82.51	15.15
20(wt%)	ND	ND	87.72	12.28
25(wt%)	7.93	2.42	77.93	11.72



รูป 4.61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของ คาร์บอน ซิลิกอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุดบริเวณกลาง splat

ตาราง 4.34 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด

ผิวเคลือบ	องค์ประกอบทางเคมี ร้อยละโดยน้ำหนัก(wt%)				
	C	O	Al	Si	Ca
ไม่ผสม	5.82	46.06	47.54	0.57	-
ผสม 5%	19.00	8.00	67.51	5.48	-
ผสม 10%	11.76	50.38	35.28	1.56	1.02
ผสม 15%	8.56	27.50	57.96	5.98	-
ผสม 20%	15.09	12.86	65.97	6.08	-
ผสม 25%	19.19	29.97	48.40	2.49	-



รูป 4.62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของ คาร์บอน ซิลิกอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด บริเวณ Interlamellar

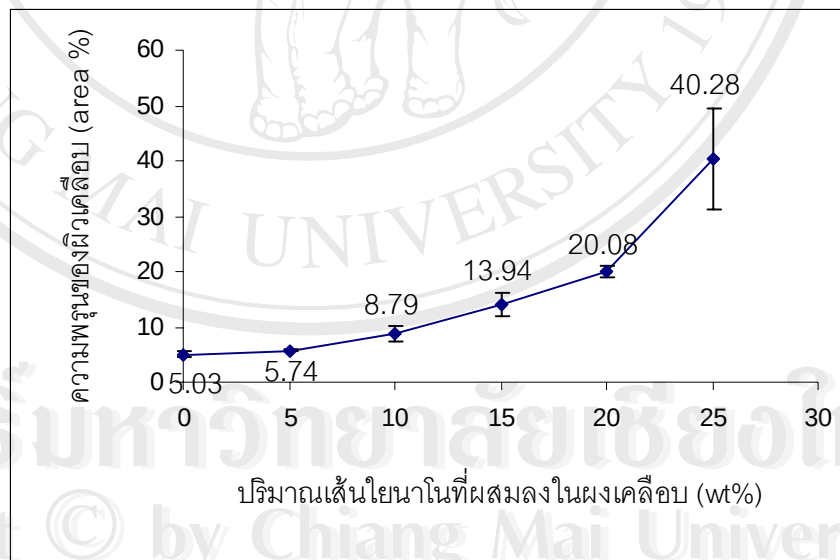
4.5 การวิเคราะห์ความพรุนของผิวเคลือบ

การวิเคราะห์ความพรุนของผิวเคลือบในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความพรุนจากภาพถ่าย AXIOVS40 version 4.2 พบว่าผิวเคลือบ Al-12Si มีความพรุนต่ำที่สุดคือประมาณร้อยละ 5.03 ของพื้นที่ และความพรุนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโน ดังตารางที่ 4.35 เมื่อพิจารณาผิวเคลือบที่ได้จากการเตรียมโดยผสมเส้นใยนาโนในปริมาณต่างๆแล้วพบว่าผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีความพรุนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่มีการผสมเส้นใยนาโนทุกปริมาณการผสม โดยมีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 5.74 ของพื้นที่ และผิวเคลือบที่มีความพรุนมากที่สุดพบในผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄) ซึ่งเป็นผิวเคลือบที่มีการผสมเส้นใยนาโนในปริมาณมากที่สุด มีความพรุนร้อยละ 40 ของพื้นที่ สาเหตุที่ทำให้ความพรุนของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นสันนิษฐานว่าเนื่องจากเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ เมื่อผสมลงไปแล้วแทรกตัวระหว่าง splat ของผิวเคลือบและทำให้การยึดเกาะกันด้วยพันธะเชิงกลแบบประสานของผิวเคลือบไม่สนิท และเกิดช่องว่างขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณมากมีความพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วย รายละเอียดการทดสอบ

แสดงในตาราง 4.34 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของผิวเคลือบกับปริมาณการผสมเส้นใยนาโนแสดงในรูป 4.59

ตาราง 4.35 ความพรุนของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄

ปริมาณเส้นใยนาโนที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si (wt%)	ความพรุนของผิวเคลือบ (area%)
0	5.03 ± 0.48
5	5.74 ± 0.22
10	8.79 ± 1.34
15	13.94 ± 2.12
20	20.08 ± 0.96
25	40.28 ± 9.20



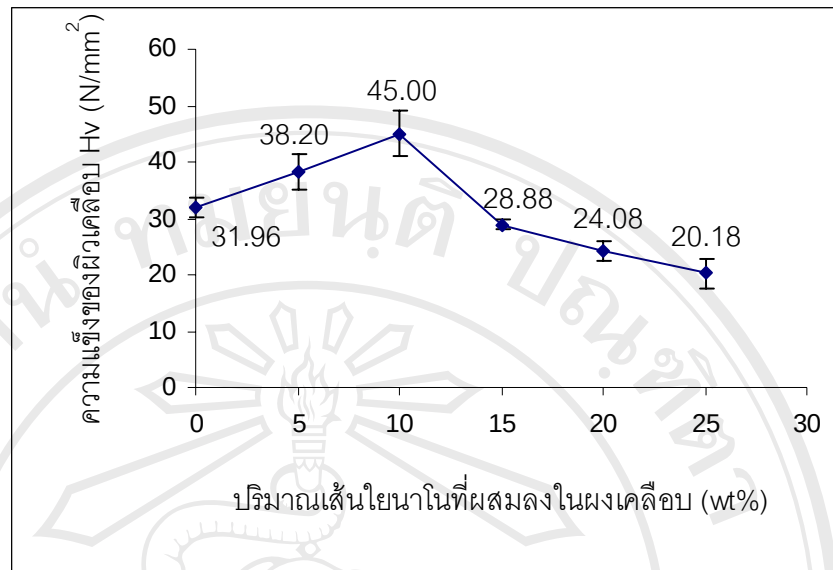
รูป 4.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของผิวเคลือบกับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si

4.6 การวิเคราะห์ความแข็งของผิวเคลือบ

การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบใช้การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ พบว่าผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโนในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากกว่าผิวเคลือบ Al-12Si ที่ไม่ผสมเส้นใยนาโนประมาณ 24% และ สำหรับผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากกว่านี้นั้นพบว่า ความแข็งของผิวเคลือบจะมีค่าลดลงอย่างมาก จากข้อมูลศึกษาพบว่าผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ มีความแข็งน้อยที่สุด และมีความแข็งน้อยกว่าผิวเคลือบ Al-12Si ที่ไม่ผสมเส้นใยนาโนประมาณ 41% ทั้งนี้คาดว่าผิวเคลือบแสดงถึงความแข็งลดลงเนื่องจากผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณมากจนทำให้โครงสร้างพันธะเชิงกลแบบประสาน (interlocking) ของผิวเคลือบนั้นไม่อยู่ในสภาพที่แข็งแรง และมีความเปราะในแนวตั้งของโครงสร้าง ผลการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบแสดงในตาราง 4.36 และรูป 4.64

ตาราง 4.36 ความแข็งของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณเส้นใยนาโนที่ผสมลงใน ผงเคลือบ Al-12Si (wt%)	ความแข็งของผิวเคลือบ HV (N/mm^2)
0	31.96 ± 1.72
5	38.20 ± 3.06
10	45.00 ± 4.01
15	28.88 ± 0.83
20	24.08 ± 1.77
25	20.18 ± 2.54



รูป 4.64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของผิวเคลือบ กับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si

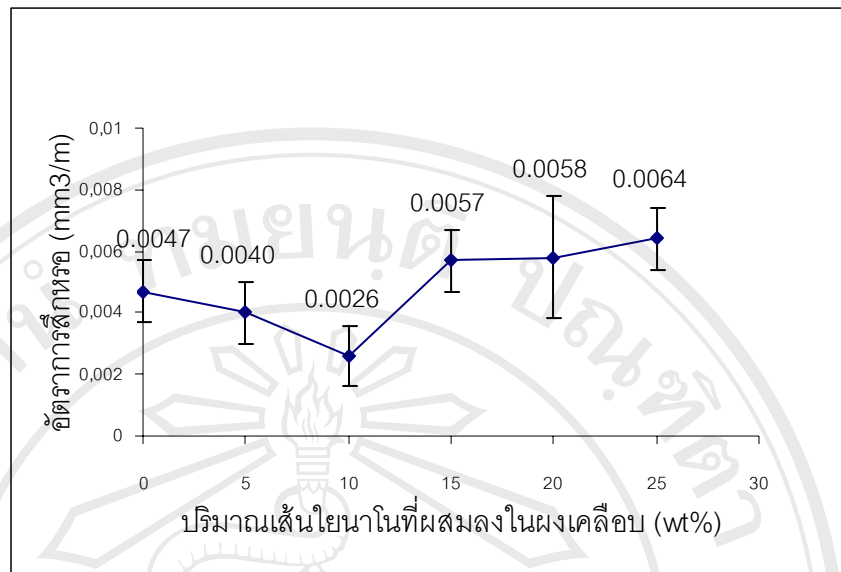
4.7 การวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ

จากผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al₄O₄C-Al₄SiC₄ ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 5 และ 10 นั้น ผิวเคลือบมีอัตราการสึกหรอลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน โดยผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด แต่สำหรับผิวเคลือบที่ได้จากการเตรียมโดยผสมเส้นใยนาโนในปริมาณมากกว่านี้ พบว่า มีค่าอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน โดยผิวเคลือบที่ได้จากการเตรียมโดยผสมเส้นใยนาโนในอัตราส่วนร้อยละ 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก นั้นทุกผิวเคลือบมีอัตราการสึกหรอมากกว่าผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโน โดยพบว่าผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักนั้นอัตราการสึกหรอมากที่สุดและมากกว่าผิวเคลือบที่ไม่ได้ผสมเส้นใยนาโนถึง 36%

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบนั้นส่งผลต่อความแข็งแรงของพันธะเชิงกลแบบประสานของผิวเคลือบที่เตรียมได้ จากรูป 4.66 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงกับอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบนั้นเป็นค่าที่แปรผกผันกัน โดยพบว่าผิวเคลือบที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดนั้นมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด และจากรูป 4.59 ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณต่างๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนในปริมาณร้อยละ 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักนั้นผิวเคลือบจะเห็นลักษณะของแถบสีดำที่กว้างขึ้นและชัดเจนมากกว่าผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ ดังตาราง 4.34 พบว่าทุกผิวเคลือบที่ทำการสุ่มวิเคราะห์มีปริมาณของ C และ Si มากกว่าปริมาณที่พบในผิวเคลือบ Al-12Si และธาตุทั้งสองชนิดก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุทั้งสองไปในลักษณะเดียวกัน คือเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มเส้นใยนาโน คาดว่าเส้นใยนาโนที่ผสมลงไปนั้นผงเคลือบเข้าไปแทรกอยู่ที่บริเวณ interlarmellar ของผิวเคลือบ และปริมาณที่มากเกินไปนั้นทำให้คุณสมบัติเชิงกลด้านการสึกหรอ และความแข็งแรงไม่ดีดังที่กล่าวมาข้างต้น

ตาราง 4.37 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณเส้นใยนาโนที่ผสมลงในผงเคลือบ Al -12Si (wt%)	อัตราการสึกหรอ (mm^3/m)
0	0.0047 ± 0.0001
5	0.0040 ± 0.0001
10	0.0026 ± 0.0001
15	0.0057 ± 0.0001
20	0.0058 ± 0.0002
25	0.0064 ± 0.0001



รูป 4.65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนของผิวเคลือบกับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al₂O₃-C-Al₄SiC₄ ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับอัตราการสึกกร่อนของผิวเคลือบ

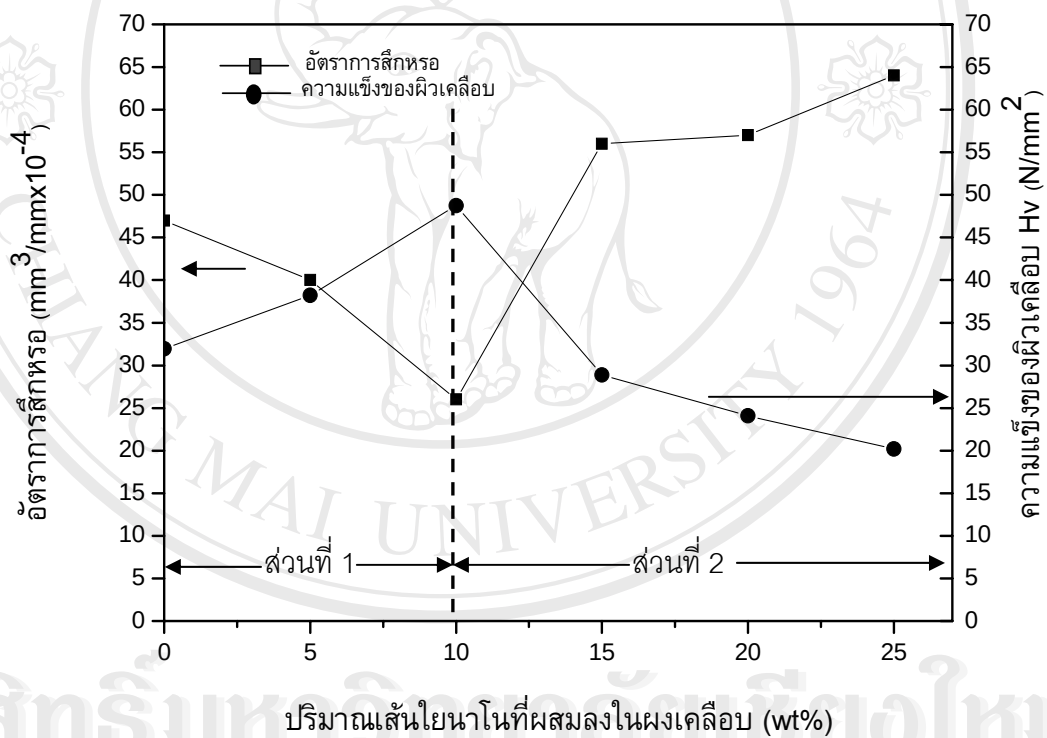
จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.66 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับอัตราการสึกกร่อนแบ่งได้เป็นสองส่วนด้วยกันดังนี้

ส่วนที่ 1 ผิวเคลือบที่ไม่ผสมเส้นใยนาโน และผสมเส้นใยนาโนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก นั้นพบว่า ผิวเคลือบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการสึกกร่อนลดลงตามปริมาณ การเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน

ส่วนที่ 2 ผิวเคลือบผสมเส้นใยนาโนในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าผิวเคลือบมีค่าความแข็งแรงลดลง ขณะที่อัตราการสึกกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโน

จากข้อมูลทดลองอธิบายได้ว่า ในส่วนที่ 1 การเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนลงในผงเคลือบนั้น คาดว่าเส้นใยนาโนได้เข้าไปแทรกอยู่ในผิวเคลือบที่เตรียมได้ ความแข็งแรงของผิวเคลือบที่เพิ่มขึ้นตาม ปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโนนั้น เป็นความแข็งแรงอันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่ดีของเส้นใยนาโน โดยที่ปริมาณเส้นใยนาโนที่แทรกอยู่ในผิวเคลือบยังไม่มากจนเกินไปจะทำให้พันธะเชิงกลแบบประสานของผิวเคลือบเสียสมดุล และยังคงสภาพความแข็งแรงของผิวเคลือบ จากกราฟจะพบว่าปริมาณส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้นเป็นปริมาณส่วนผสมที่มากที่สุดที่ยังคงทำให้

พันธะเชิงกลแบบประสานอยู่ในสภาวะสมดุล จึงเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ผิวเคลือบมีความแข็งแรงมากที่สุด และอัตราการสึกหรอต่ำสุด สำหรับปริมาณส่วนผสมเส้นใยนาโนที่มากกว่านี้พบว่า ยิ่งเพิ่มปริมาณส่วนผสมเส้นใยนาโน ความแข็งของผิวเคลือบมีค่าลดลง อัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น คาดว่าปริมาณเส้นใยนาโนที่ผสมมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้น เป็นปริมาณที่ทำให้มีเส้นใยนาโนแทรกอยู่ในผิวเคลือบมากเกินไป และทำให้พันธะเชิงกลแบบประสานของผิวเคลือบไม่แข็งแรง และเสียสมดุล จึงเป็นผลให้ผิวเคลือบมีความแข็งแรงลดลง และอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมเส้นใยนาโนดังกล่าว



รูป 4.66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการสึกหรอ ความแข็งของผิวเคลือบ และปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al₂O₃-C-Al₂SiC₄ ที่ผสมลงในผงเคลือบ ในดังกล่าว Al-12Si