

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ซิลิคอนคาร์ไบด์	4
2.1.1 คุณสมบัติสารประกอบซิลิคอนคาร์ไบด์	4
2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์คาร์ไบด์	8
2.2.1 กระบวนการเกิดออกไซด์คาร์ไบด์	8
2.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน	10
2.3.1 ทฤษฎีการสร้างตัวของเส้นใยนาโนแบบกลไกไอ-ของเหลว-ของแข็ง	10
2.3.2 กลไกการเกิดเส้นใยนาโนแบบไอ-ของเหลว-ของแข็งกรณีที่มีตัวคะตะลิสต์	11
2.3.3 เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า	12
2.4 การพ่นเคลือบด้วยความร้อน	13
2.4.1 ประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน	15
2.4.2 การเปรียบเทียบการใช้งานของแต่ละกระบวนการ	21
2.4.3 วัสดุเคลือบ	21
2.4.4 การประยุกต์ใช้งานของผิวเคลือบ	22
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ	24
2.5.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	24
2.5.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
2.5.3 การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์	25
2.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ	26
2.6.1 ความแข็ง	26

2.6.2 ความต้านทานการสึกหรอ	29
<b>บทที่ 3 วิธีการวิจัย</b>	31
3.1 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	32
3.1.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโน	32
3.1.2 การวิเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยนาโน	32
3.1.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า	32
3.2 การผสมผงฟ้นเคลือบ Al-12Si กับเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	35
3.2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมผงฟ้นเคลือบ	35
3.2.2 วิธีการเตรียมผงเคลือบ Al+12Si+( SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	36
3.3 การเตรียมผิวเคลือบ	36
3.3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมผิวเคลือบ	36
3.3.2 วิธีการและขั้นตอนการพ่นเคลือบ	37
3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ	39
3.4.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้	39
3.4.2 การเตรียมชิ้นงานผิวเคลือบสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ	40
3.4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมี	41
3.4.4 การวัดความแข็งของผิวเคลือบ	41
3.4.5 การหาความพรุนของผิวเคลือบ	41
3.4.6 การทดสอบการสึกหรอ	43
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	45
4.1 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นและเส้นใยนาโน	45
4.1.1 โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น	45
4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	48
4.1.3 การตรวจสอบสารประกอบในเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	52
4.2 การวิเคราะห์ผงฟ้นเคลือบ	54
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si	54

4.2.2 ผงเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	56
4.2.3 ผงเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	59
4.2.4 ผงเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	62
4.2.5 ผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	65
4.2.6 ผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	68
4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ	71
4.4 การวิเคราะห์ผิวเคลือบ	75
4.4.1 ผิวเคลือบ Al-12Si	75
4.4.2 ผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	80
4.4.3 ผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	86
4.4.4 ผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	92
4.4.5 ผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	98
4.4.6 ผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	105
4.4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ	111
4.4.8 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ	113
4.5 การวิเคราะห์ความพรุนของผิวเคลือบ	118
4.6 การวิเคราะห์ความแข็งของผิวเคลือบ	120
4.7 การวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ	121
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ	123
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	125
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	128
<b>ภาคผนวก</b>	130
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	154

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์	4
2.2 เปรียบเทียบกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน	21
3.1 สภาวะการพ่นเคลือบผง Al-12Si และผง Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	37
3.2 ภาวะการทดสอบการสึกหรอแบบจานหมุนของผิวเคลือบ	43
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของใส่ดินสอ	47
4.2 การจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	50
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด	51
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่	51
4.5 องค์ประกอบทางเคมีอนุภาคที่อยู่ในเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่	52
4.6 แสดงร้อยละของสารประกอบในเส้นใยนาโนที่ได้จากการคำนวณความเข้มของ XRD พีคสูงสุด	54
4.7 องค์ประกอบทางเคมีของผง Al-12Si	55
4.8 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	59
4.9 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	62
4.10 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	65
4.11 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	68
4.12 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	71
4.13 องค์ประกอบทางเคมีของผงเคลือบ Al-12Si เมื่อผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่างๆ	72
4.14 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ Al-12Si	76
4.15 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si	77
4.16 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si	78

ตาราง	หน้า
4.17 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	81
4.18 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	83
4.19 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 5(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	83
4.20 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	87
4.21 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิว $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	89
4.22 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 10(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	89
4.23 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	93
4.24 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	95
4.25 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	96
4.26 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	99
4.27 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	101
4.28 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิว $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	102
4.29 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	106
4.30 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิว $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	108
4.31 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$	109
4.32 องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่	115
4.33 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด	116
4.34 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ ในปริมาณต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุด	117

ตาราง	หน้า
4.35 ความพรุนของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่างๆ	119
4.36 ความแข็งของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่างๆ	120
4.37 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si ที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่างๆ	122
ก.1 แสดงความพรุนของผิวเคลือบที่ได้จากการผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	130
ข.1 แสดงความแข็งของผิวเคลือบที่ได้จากการผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	131
ค.1 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si ครั้งที่ 1	133
ค.2 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si ครั้งที่ 2	134
ค.3 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si	134
ค.4 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 1	135
ค.5 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 2	136
ค.6 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	136
ค.7 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 1	137
ค.8 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 2	138
ค.9 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	138
ค.10 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 1	139
ค.11 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 2	140
ค.12 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	140
ค.13 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 1	141
ค.14 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 2	142
ค.15 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	142
ค.16 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 1	143
ค.17 การทดสอบผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ครั้งที่ 2	144
ค.15 อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	144
จ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบ	153



## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างซิลิคอนคาร์ไบด์ทรงลูกบาศก์ ( $\beta$ -SiC) และทรงหกเหลี่ยม ( $\alpha$ -SiC)	6
2.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)	7
2.3 การเปลี่ยนเฟสของสารประกอบที่อุณหภูมิ 800 – 1700 องศาเซลเซียส	9
2.4 แสดงรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวและของเหลว-ก๊าซ	11
2.5 แสดงเงื่อนไขการเกิดเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์โดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า กรณีที่มีการเติมตัวคะตะลิสต์	11
2.6 แผนผังอุปกรณ์วิธีการสังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยวิธีการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า	13
2.7 ลักษณะของผิวเคลือบที่พ่นเคลือบด้วยความร้อน	14
2.8 การพ่นเคลือบด้วยระบบเปลวไฟโดยใช้ผง	16
2.9 การพ่นเคลือบด้วยระบบเปลวไฟโดยใช้ลวด	16
2.10 กระบวนการพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนเหลว	17
2.11 กระบวนการพ่นแบบปืนจุดระเบิด	18
2.12 กระบวนการพ่นแบบพลาสมา	19
2.13 กระบวนการพ่นแบบอาร์ค	20
2.14 แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์	26
2.15 แสดงลักษณะรอยกุดจากหัวเพชรของการกัดแบบวิกเกอร์	28
3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินวิจัย	31
3.2 แผนภาพชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ด้วยกระแสไฟฟ้า	33
3.3 ดินสอเบอร์ EE ยี่ห้อ STAEDTLER	34
3.4 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	34
3.5 ลักษณะเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้นรอบนอกไส้ดินสอ	34
3.6 ลักษณะผิวด้านในเส้นใยนาโนที่แยกออกมาจากไส้ดินสอ	35
3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
3.8 เครื่องตัดชิ้นงาน	38

รูป	หน้า
3.9 ปืนพ่นแบบเปลวไฟ	38
3.10 ชุดป้อนผง	38
3.11 ติดตั้งชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึด	39
3.12 เครื่องหล่อเรซิน	40
3.13 เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์	42
3.14 กล้องจุลทรรศน์แสง และชุดโปรแกรมวิเคราะห์หาความพรุนจากภาพถ่าย AXIOVS40 version 4.2	42
3.15 แสดงลักษณะทั่วไปของผิวเคลือบ	42
3.16 รูปแสดงการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการสึกหรอแบบจานหมุน	44
4.1 ภาพถ่าย SEM ของไส้ดินสอที่ใช้เป็นสารตั้งต้น	46
4.2 สเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM ของไส้ดินสอ	46
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไส้ดินสอ	47
4.4 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	49
4.5 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบจุด	49
4.6 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	50
4.7 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบพื้นที่	51
4.8 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของอนุภาคที่แทรกอยู่ในเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	52
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยนาโน	53
4.10 ภาพถ่าย SEM ของผงเคลือบ Al-12Si	55
4.11 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ แบบพื้นที่	55
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si	56
4.13 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	58



รูป	หน้า
4.14 ผลการวิเคราะห์ EDS-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบพื้นที่	58
4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	59
4.16 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	61
4.17 การวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่	61
4.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	62
4.19 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	64
4.20 การวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่	64
4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	65
4.22 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	67
4.23 การวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่	67
4.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	68
4.25 ภาพ SE-SEM ของผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	70
4.26 การวิเคราะห์ผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ด้วย EDS-SEM แบบพื้นที่	70
4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	71
4.28 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงพ่นเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD	74
4.29 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si กำลังขยาย 120 เท่า	75
4.30 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si	75

รูป	หน้า
4.31 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si	77
4.32 การวิเคราะห์บริเวณ interlamella ของผิวเคลือบ Al-12Si	78
4.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si	79
4.34 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	80
4.35 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C- Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	81
4.36 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	82
4.37 การวิเคราะห์บริเวณ interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	83
4.38 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al -12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	85
4.39 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEMของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	86
4.40 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	86
4.41 วิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	88
4.42 วิเคราะห์บริเวณกลาง interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	89
4.43 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	91
4.44 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง BSE-SEMของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	92
4.45 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	93

รูป	หน้า
4.46 การวิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	95
4.47 การวิเคราะห์บริเวณกลาง interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	96
4.48 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	97
4.49 ภาพภาคตัดขวาง BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	98
4.50 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	99
4.51 วิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	101
4.52 วิเคราะห์บริเวณกลาง interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	102
4.53 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si + 15(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	103
4.54 ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	105
4.55 ภาพสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDS-SEM แบบพื้นที่ของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	105
4.56 วิเคราะห์บริเวณกลาง splat ของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	107
4.57 วิเคราะห์บริเวณกลาง interlamellar ของผิวเคลือบ Al-12Si + 20(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	108
4.58 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผิวเคลือบ Al-12Si + 25(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> )	110
4.59 (ก)-(จ) ภาพ BSE-SEM ของผิวเคลือบที่ผสมเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ในปริมาณต่าง ๆ	112

รูป	หน้า
4.60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน ซิลิคอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบพื้นที่	116
4.61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของ คาร์บอน ซิลิคอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุดบริเวณกลาง splat	117
4.62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัตราส่วนผสมของเส้นใยนาโนและร้อยละโดยอะตอมของ คาร์บอน ซิลิคอน และอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-SEM แบบจุดบริเวณ interlamellar	118
4.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพูนของผิวเคลือบกับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si	119
4.64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของผิวเคลือบกับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si	121
4.65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบกับปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si	123
4.66 กราฟระหว่าง อัตราการสึกหรอ ความแข็งของผิวเคลือบ และปริมาณเส้นใยนาโน SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ที่ผสมลงในผงเคลือบ Al-12Si	124
ค.1 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si ในการทดสอบครั้งที่ 1	133
ค.1 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si ในการทดสอบครั้งที่ 2	134
ค.3 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ในการทดสอบครั้งที่ 1	135
ค.4 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 5(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ในการทดสอบครั้งที่ 2	136
ค.5 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ในการทดสอบครั้งที่ 1	137
ค.6 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ Al-12Si + 10(SiC-Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C-Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> ) ในการทดสอบครั้งที่ 2	138

รูป	หน้า
ค.7 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 1	139
ค.8 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 15(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 2	140
ค.9 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 1	141
ค.10 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 20(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 2	142
ค.11 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 1	143
ค.12 กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ $\text{Al-12Si} + 25(\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4)$ ในการทดสอบครั้งที่ 2	144
ง.1 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของอะลูมินา	145
ง.2 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของซิลิคอนออกไซด์	146
ง.3 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของคาร์บอน	147
ง.4 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของเบตา-ซิลิคอนคาร์ไบด์	148
ง.5 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของอะลูมินาเททรอกซีคาร์ไบด์	149
ง.6 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของอะลูมิเนียมซิลิคอนคาร์ไบด์	150
ง.7 แสดงมาตรฐาน JCPDS ของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน	151
จ.1 กราฟแสดงการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบของเส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$	152

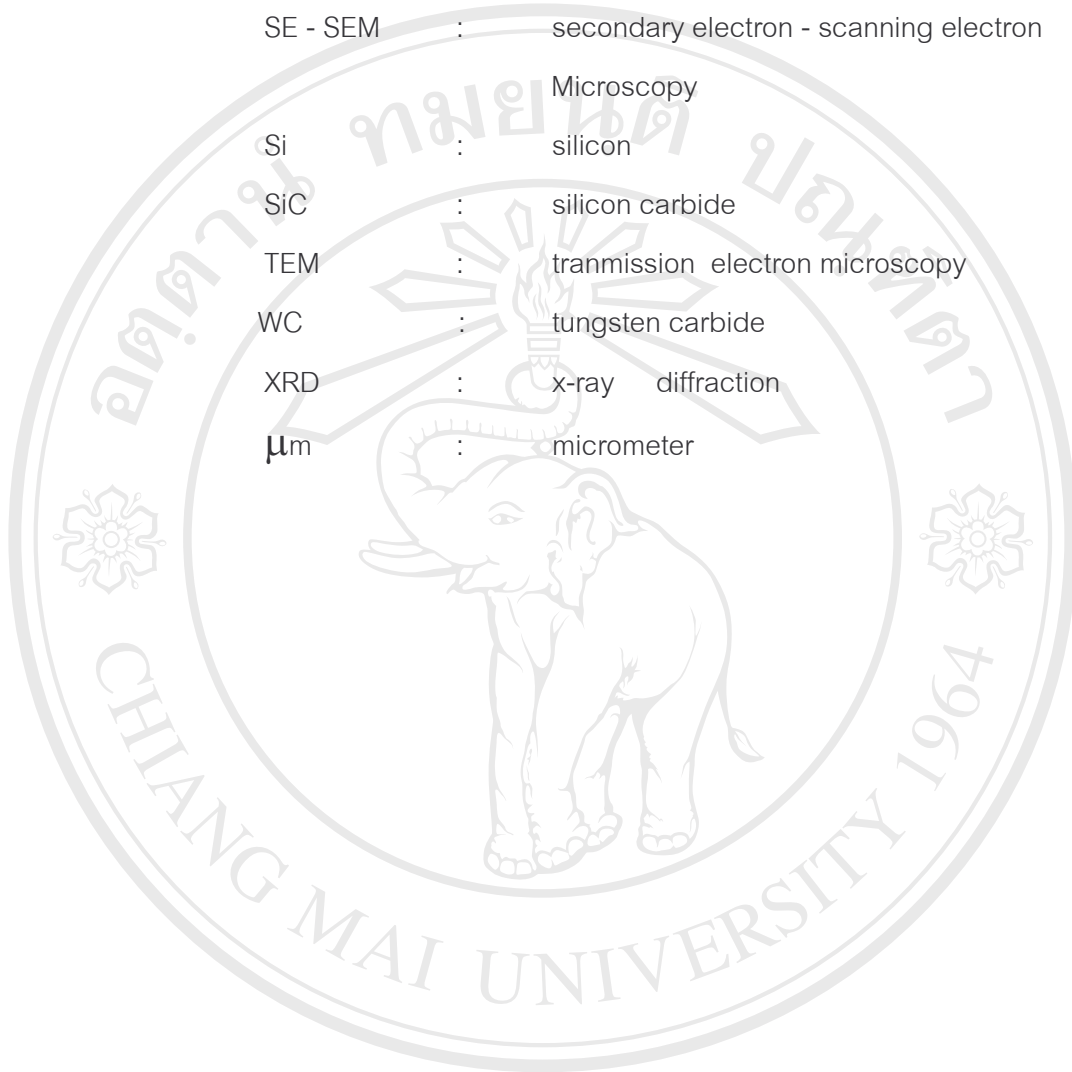
สัญลักษณ์และคำย่อ

Al	:	aluminium
Al - 12Si	:	aluminium 12 weight percent Silicon
Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C	:	aluminium tetroxycarbide
Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>	:	aluminium silicon carbide
BSE - SEM	:	backscattered electron-scanning electron microscopy
C	:	carbon
°C	:	degree Celsius
Cal / g•K	:	calorie/gram •Kelvin
cm / s	:	centimeter / second
D.C.	:	direct electric current
EDS	:	energy dispersive spectroscopy
ft <sup>3</sup> / h	:	cubic foot / hour
g	:	gram
g / cm <sup>3</sup>	:	gram / cubic centimeter
GPa	:	gigapascal
Hv	:	Vickers microhardness
hr	:	hour
kg	:	kilogram
kg / mm <sup>2</sup>	:	kilogram / millimeter square
kPa	:	kilopascal
kV	:	kilovolt
m	:	meter
mm	:	millimeter
mg	:	milligram
m / s	:	meter / second
O	:	oxygen

ลิขสิทธิ์ทางวิทยาศาสตร์ของเชียงใหม่  
 Copyright © by Chiang Mai University  
 All rights reserved



OM	:	optical microscope
SEM	:	scanning electron microscope
SE - SEM	:	secondary electron - scanning electron Microscopy
Si	:	silicon
SiC	:	silicon carbide
TEM	:	transmission electron microscopy
WC	:	tungsten carbide
XRD	:	x-ray diffraction
$\mu\text{m}$	:	micrometer



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved