สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ซ
สารบาญตาราง	ซ
สารบาญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	6
2.1 ทบทวนเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม	14
2.3 ท่อนาโนคาร์บอน	17
2.3.1 ลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอน	17
2.3.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี	19
2.3.3 กลไกการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน	23
2.4 การสังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ด้วยวิธีออกซิเดชัน	24
2.5 การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	25
2.6 ประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน	27
2.6.1 การพ่นแบบเปลวไฟ	27
2.6.2 การพ่นแบบอาร์ค	28
2.6.3 การพ่นแบบเชื้อเพลิง–ออกซิเจนความเร็วสูง	29
2.6.4 การพ่นแบบปืนจุดระเบิด	30
2.6.5 การพ่นแบบพลาสมา	31
2.7 ความแข็ง	34

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.8 ความต้านทานต่อการขูดขีด 37
2.9 การสึกหรอ 38

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 47
3.1 สารเคมี วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ 49
3.1.1 สารเคมี 49
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ 49
3.1.3 เครื่องมือ 50
3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง 53
3.2.1 การสังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 53
3.2.2 การสังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 54
3.2.3 การวิเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต 55
3.2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 55
3.2.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 55
3.2.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 56
3.2.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 57
3.2.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิตด้วยรามานสเปกโตรสโกปี 58
3.2.4 การเตรียมผิวเคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเปลวไฟ 59
3.2.5 การวิเคราะห์ผิวเคลือบ 60
3.2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ 60
3.2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 61
3.2.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 62

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบ 62
3.2.7 การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ 62
3.2.8 การทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของผิวเคลือบ 63
3.2.9 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ 64

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองผงเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต 66
4.1 ผลการวิเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ 66
4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ 66
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ 68
4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 68
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 70
4.2 ผลการวิเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 71
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 71
4.2.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 71
4.2.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 75
4.2.2 อิทธิพลของเวลาในการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 81
4.2.2.1 อิทธิพลของเวลาต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 81
4.2.2.2 อิทธิพลของเวลาต่อองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 83
4.3 ผลการวิเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 88
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 88

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 88
4.3.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 90
4.3.2 อิทธิพลของเวลาในการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 94
4.3.2.1 อิทธิพลของเวลาต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 94
4.3.2.2 อิทธิพลของเวลาต่อองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 96

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต 98
5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ 98
5.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ 103
5.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 103
5.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 113
5.3 สมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม และผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต 114
5.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งผิวเคลือบด้วยเทคนิคการกดแบบวิกเกอร์ส 115
5.5 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการขูดขีด 117
5.6 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ 119

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 125
6.1 สรุปผลการทดลอง 123
6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง 124
6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานในอนาคต 124

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง 126

ภาคผนวก 132

ภาคผนวก ก อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาสังเคราะห์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนและนาโนวิสเกอร์ 133

ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนแบบวงแหวนของท่อนาโนคาร์บอน 136

ภาคผนวก ค ข้อมูลความหยาบของผิวเคลือบ 138

ภาคผนวก ง ข้อมูลความหนาของผิวเคลือบ 139

ภาคผนวก จ ข้อมูลร้อยละความพรุนของผิวเคลือบ 140

ภาคผนวก ฉ ข้อมูลชั้นออกไซด์ของผิวเคลือบ 141

ภาคผนวก ช ความแข็งของผิวเคลือบ 142

ภาคผนวก ซ ความต้านทานต่อการขูดขีดของผิวเคลือบ 144

ภาคผนวก ฌ การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบ 147

ภาคผนวก ญ ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 156

ประวัติผู้เขียน 160

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไทรโบโลจีของผิวเคลือบอะลูมิเนียม–อะลูมินาคอมโพสิตและซับสเตรท	7
2.2	เปรียบเทียบความหนาแน่นกับความแข็งจุลภาคของผิวเคลือบคอมโพสิต Al–10wt% CNT และแท่ง 6061 Al	10
2.3	ลักษณะเฉพาะโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ HA–CNT	12
2.4	อัตราการสึกหรอระดับมหาภาค (ในรูปของการสูญเสียปริมาตร) ของผิวเคลือบแบบพลาสมา	13
2.5	สมบัติทางกายภาพบางประการของเหล็กกล้าไร้สนิม 431	16
2.6	การเปรียบเทียบลักษณะของระบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	33
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 431 ผลิตโดยบริษัท SULZER METCO	49
3.2	สภาวะในการพ่นเคลือบระบบเปลวไฟของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต	59
3.3	สภาวะในการทดสอบการสึกหรอของผิวเคลือบแบบไถล	64
4.1	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	69
4.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	78
4.3	แสดงอัตราส่วนระหว่างความเข้มของ D band และ G band ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส	81
4.4	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	85
4.5	แสดงอัตราส่วนระหว่างความเข้มของ D band และ G band ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เวลา 30–60 นาที	87
4.6	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	93
5.1	องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	105

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.2	องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	108
5.3	องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนที่พบในผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	110
5.4	องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	112
5.5	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบ	114
5.6	ค่าความแข็งแบบวิสเกอร์สของผิวเคลือบที่น้ำหนักกด 300 กรัม	116
5.7	ค่าความแข็งของผิวเคลือบที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด	118
5.8	อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ	121
ก(1)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์	133
ก(2)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อศึกษาเวลาที่ใช้สังเคราะห์	133
ก(3)	อิทธิพลของอุณหภูมิสังเคราะห์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนวิสเกอร์	134
ก(4)	อิทธิพลของเวลาสังเคราะห์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนวิสเกอร์	135
ข(1)	ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนแบบวงแหวนของท่อนาโนคาร์บอน	136
ข(2)	ค่าคงที่จากกล้อง	137
ค	ข้อมูลความหยาบของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต	138
ง	ข้อมูลความหนาของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต	139
จ	ข้อมูลร้อยละความพรุนของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต	140
ฉ	ข้อมูลชั้นออกไซด์ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนคอมโพสิต	141
ช(1)	ความแข็งของผิวเคลือบ เมื่อใช้น้ำหนัก 300 กรัม ในหน่วย $HV_{0.3}$	142
ช(2)	ความแข็งของผิวเคลือบ เมื่อใช้น้ำหนัก 300 กรัม ในหน่วย GPa	143
ซ(1)	ความต้านทานต่อการขูดขีดของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์	144
ซ(2)	ความแข็งของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์จากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด	144

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซ(3) ความต้านทานต่อการขูดขีดของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน 145
ซ(4) ความแข็งของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนจากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด 145
ซ(5) ความต้านทานต่อการขูดขีดของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 146
ซ(6) ความแข็งของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์จากเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด 146
ฌ(1) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 147
ฌ(2) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 148
ฌ(3) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 149
ฌ(4) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 150
ฌ(5) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 151
ฌ(6) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 152
ฌ(7) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 153
ฌ(8) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 154
ฌ(9) การสึกหรอแบบไถลของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 155

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	ภาพถ่าย OM ของผิวเคลือบพลาสมาที่มีอะลูมิเนียมเป็นหลักกับอะลูมินา	7
2.2	ภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต $MoSi_2$–Si_3N_4	8
2.3	ภาคตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต Al_2O_3–Al ที่มีโครงสร้างที่แน่นตัว	9
2.4	ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกของผิวเคลือบ Al–Si กับ CNT	10
2.5	ผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต Al_2O_3–11wt% MWCNT	11
2.6	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวของผิวเคลือบ HA และผิวเคลือบ HA–4wt% CNT	12
2.7	กราฟการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนกับอุณหภูมิ	13
2.8	ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน	17
2.9	รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบ Armchair, Zig-zag และ Chiral	17
2.10	ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	18
2.11	แผนภาพวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา	20
2.12	แผนภาพวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน	21
2.13	เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	21
2.14	เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก	22
2.15	เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน	22
2.16	ภาพจำลองขั้นตอนการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน แบบ Root growth และแบบ Tip growth	23
2.17	ภาพจำลองอันตรกิริยาระหว่างฐานรองกับอนุภาคโลหะคะตะลิสต์	24
2.18	แบบจำลองกระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์	25
2.19	ไดอะแกรมการสร้างผิวเคลือบ	26
2.20	ไดอะแกรมโครงสร้างของผิวเคลือบที่เกิดจากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	26
2.21	การพ่นเคลือบแบบเปลวไฟโดยใช้ผงเป็นวัสดุเคลือบ	28
2.22	การพ่นเคลือบแบบเปลวไฟโดยใช้ลวดเป็นวัสดุเคลือบ	28
2.23	การพ่นเคลือบแบบอาร์ค	29
2.24	การพ่นเคลือบแบบเชื้อเพลิง–ออกซิเจนความเร็วสูง	30
2.25	การพ่นเคลือบแบบปืนจุดระเบิด	31

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.26	การพ่นเคลือบแบบพลาสมา	32
2.27	ลักษณะหัวกด และรอยกดความแข็งแบบวิกเกอร์ส	35
2.28	ลักษณะหัวกด และรอยกดความแข็งแบบนูป	36
2.29	กลไกการสึกหรอแบบติดกันของวัสดุ (a) และ (b)	39
2.30	ภาพถ่าย SEM ลักษณะการสึกหรอของทองเหลืองกับลูกบอลเหล็กกล้าแบบ (a) ploughing, (b) wedge และ (c) cutting	40
2.31	ลักษณะการสึกหรอแบบแตกหัก	40
2.32	(a) การสึกหรอแบบขัดถูสองพื้นผิว และ (b) การสึกหรอแบบขัดถูที่มีตัวกลางระหว่างสองพื้นผิว	41
2.33	อัตราการกัดเซาะกับมุมตกกระทบของวัสดุ	42
2.34	เครื่องมือทดสอบแบบไถล	45
2.35	เครื่องมือทดสอบแบบ Dry–Sand Abrasion	45
2.36	เครื่องมือทดสอบแบบ Disk–on–Disk	46
2.37	เครื่องมือทดสอบแบบ Solid–Particle Erosion	46
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม	48
3.2	ชุดเครื่องพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเปลวไฟ (a) ชุดป้อนผง และ (b) ปืนพ่น	51
3.3	เครื่องตัดชิ้นงาน	51
3.4	เครื่องขัดชิ้นงาน	52
3.5	เครื่องขึ้นเรือนแบบร้อน	52
3.6	เครื่องวัดความหยาบ	52
3.7	(a) ระบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี และ (b) แผนภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ	53
3.8	ระบบการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาออกซิเดชัน	54
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55
3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	56
3.11	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	57
3.12	การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานอิเล็กตรอนภายในอะตอมส่งผลให้เกิดรังสีเอกซ์	58
3.13	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	60
3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิด LV	61

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.15	เครื่องวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส	63
3.16	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู	63
3.17	เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบไถล	65
4.1	ภาพถ่าย SEM (a) ผงเหล็กกล้าไร้สนิม และ (b) พื้นผิวของผงเหล็กกล้าไร้สนิม ที่กำลังขยาย 150 และ 1000 เท่า	67
4.2	กราฟการกระจายขนาดของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ จากภาพถ่าย SEM	67
4.3	กราฟการกระจายขนาดของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่วัดจากเครื่องวัดขนาดอนุภาค	68
4.4	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	69
4.5	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	69
4.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับ JCPDS	70
4.7	ลักษณะ (a) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์, (b) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และ (c) ผงเหล็กกล้าไร้สนิม (b) ที่กำลังขยาย 20000	72
4.8	ภาพถ่าย TEM ของเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่กำลังขยาย 20000 เท่า	72
4.9	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ (a) 500, (b) 550, (c) 600, (d) 650, (e) 700, (f) 750 และ (g) 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 20000 เท่า	74
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส	75
4.11	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	76
4.12	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	76
4.13	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	77

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.14	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	77
4.15	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	77
4.16	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	78
4.17	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเริ่มต้นและเหล็กกล้าไร้สนิมที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส เทียบกับ JCPDS	79
4.18	รามานสเปกตรัมของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส	80
4.19	ผงพ่นเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ โดยที่ (a) 30, (b) 60, (c) 90, (d) 120 และ (e) 180 นาที ที่กำลังขยาย 20000 เท่า	82
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้สังเคราะห์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เวลา 30–180 นาที	83
4.21	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	84
4.22	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	84
4.23	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	84
4.24	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	85
4.25	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที และสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	85
4.26	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิมที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส เทียบกับ JCPDS	86
4.27	รามานสเปกตรัมผงเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน สังเคราะห์ที่ 30–180 นาที	87
4.28	ภาพถ่าย SEM (a) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ และ (c) ภาพถ่าย TEM เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์	88

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.29	ผงพ่นเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ (a) 550, (b) 600, (c) 650, (d) 700, (e) 800 และ (f) 800 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 10000 เท่า	89
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้สังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนวิสเกอร์	90
4.31	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส	91
4.32	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	92
4.33	ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	92
4.34	รามานสเปกตรัมของ (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และ (b) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์	93
4.35	ผงพ่นเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (a) 60, (b) 120, (c) 180, (d) 240, (e) 300 และ (f) 360 นาที ที่กำลังขยาย 10000 เท่า	94
4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้สังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนวิสเกอร์	95
4.37	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์คอมโพสิตที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60–360 นาที	96
5.1	ภาพ BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า	99
5.2	ภาพ BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า	99
5.3	รอยหักของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่พบท่อนาโนคาร์บอนอยู่แบบเดี่ยว	100
5.4	รอยหักของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนที่พบท่อนาโนคาร์บอนอยู่แบบรวมกลุ่มกัน เมื่อ (a), (c), (e) และ (e) ที่กำลังขยายต่ำ และภาพ (b) และ (d) ภาพกำลังขยายสูงของ (a) และ (c) ตามลำดับ	101

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.5	ภาพ BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่กำลังขยาย (a) 100 และ (b) 1000 เท่า	102
5.6	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	104
5.7	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	104
5.8	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	104
5.9	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์และการวิเคราะห์แบบแผนที่	105
5.10	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	106
5.11	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	106
5.12	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	107
5.13	ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์แบบแผนที่	107
5.14	ภาพถ่าย SEM ของรอยหักผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	109
5.15	ภาพถ่าย SEM ของรอยหักผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	109
5.16	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 1 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบพื้นที่	110
5.17	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 2 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	111
5.18	ภาพถ่าย BSE–SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และสเปกตรัม 3 ของการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบจุด	111

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.19 ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์และการวิเคราะห์แบบแผนที่ 112
5.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผิวเคลือบ 113
5.21 ภาพถ่ายรอยกดแบบวิกเกอร์สของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) ผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ 115
5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งในหน่วยจิกะปาสคาลของผิวเคลือบ 116
5.23 ตัวอย่างภาพถ่าย OM ของรอยขูดของผิวเคลือบ (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 1500 กรัม 117
5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยขูดกำลังสองกับน้ำหนักที่ให้ 118
5.25 รอยการสึกหรอของผิวเคลือบที่ระยะทดสอบ 75 เมตร โดยใช้น้ำหนัก 150 กรัม (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์, (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ (d)–(f) ภาพกำลังขยายสูงของ (a)–(c) ตามลำดับ 119
5.26 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวเคลือบ (a) เหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์ (b) เหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน และ (c) เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ที่น้ำหนักทดสอบ 250 กรัม ที่ระยะทางทดสอบ 100 เมตร 120
5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับน้ำหนักกด 122
ฌ(1) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 147
ฌ(2) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 148
ฌ(3) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 75 กรัม 149
ฌ(4) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 150
ฌ(5) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 151
ฌ(6) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 150 กรัม 152

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ฌ(7) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 153
ฌ(8) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม/ท่อนาโนคาร์บอน ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 154
ฌ(9) กราฟอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ ที่น้ำหนักกด 250 กรัม 155
ญ(1) ไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของเหล็ก 156
ญ(2) ไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของโครเมียม 157
ญ(3) ไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของเหล็กออกไซด์ 158
ญ(4) ไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของคาร์บอน 159

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved