

พฤติกรรมการศึกษาของดอกกัทที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ
โดยวิธีไอระเหยทางฟิล์ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**WEAR BEHAVIOR OF MILLING TOOL SURFACE
COATED BY PVD**

Jadesada Rujisomnapa



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

พฤติกรรมการศึกษาของดอกกัทที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ
โดยวิธีไอระเหยทางฟิล์ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ฐาปนี พัทธวิชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พรวิภา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สงบ คำค้อ)

กรรมการ

(อ. ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจษฎา รุจิสมนภา : พฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโดยวิธีไอ
ระเหยทางฟิสิกส์ (WEAR BEHAVIOUR OF DRILLING TOOL SURFACE COATED
BY PVD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา, 110 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางระเหยฟิสิกส์แบบคาโทดิกอาร์ค (Cathodic arc) คือ ชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN), ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN), อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) เปรียบเทียบกับดอกกัดที่ไม่ได้เคลือบ พฤติกรรมการสึกหรอศึกษาโดยการทดสอบความแข็งระดับนาโน การทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด และการทดสอบการใช้งานจริงโดยกัดผิวด้วยเครื่อง Computer numerical control (CNC) ทดสอบการเกิดออกซิเดชันในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน จากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด และทดสอบค่าความแข็งระดับนาโน พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีความแข็งและความสามารถในการยึดเกาะสูงกว่าชั้นเคลือบ TiN, AlCrN และ TiAlSiN ตามลำดับ จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พบว่าชั้นเคลือบ AlCrN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN และ TiN สำหรับการทดสอบกัดผิวซึ่งแสดงผลด้วยค่าการสึกหรอสูงสุดของคมตัดกับระยะทางในการตัดพบว่า ชั้นเคลือบ AlCrN มีประสิทธิภาพสูงสุด ออกไซด์ของชั้นเคลือบต่างๆ เช่น TiO_2 สำหรับชั้นเคลือบ TiN, TiO_2 สำหรับชั้นเคลือบ TiAlSiN, TiO_2 สำหรับชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ Cr_2O_3 สำหรับชั้นเคลือบ AlCrN โดยชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าชั้นเคลือบ TiAlSiN และ TiN จากผลทั้งหมดเห็นได้ชัดเจนว่าชั้นเคลือบ AlCrN มีความสามารถในการต้านต่อการสึกหรอดีกว่าชั้นเคลือบ TiN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

JADESADA RUJISOMNAPA : WEAR BEHAVIOUR OF DRILLING

TOOL SURFACE COATED BY PVD. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. PORNWASA WONGPANYA, Ph.D., 110 PP.

OXIDATION/MAXIMUM FLANK WEAR/COATINGS/COF

The objective of this research is to study wear behavior of TiN, AlCrN and TiAlSiN coated on cemented carbide end mill deposited by cathodic arc physical vapor deposition methods in comparison with uncoated end mill. Wear behavior was investigated by nanoindentation hardness test, scratch test and cutting test. Oxidation test was also done in air at temperatures of 700°- 900°C in order to evaluate oxidation resistance. From the nanoindentation hardness and scratch tests, AlCrTiSiN coating exhibited higher hardness and adhesion ability than AlCrN, TiAlSiN and TiN coatings, respectively. From the coefficient of friction (COF) results, AlCrN coating exhibited lower COF than AlCrTiSiN, TiAlSiN and TiN coatings. The cutting performance, represented in terms of maximum flank wear as a function of cutting length, was found to be highest in the AlCrN coating. Oxides of these coatings are TiO₂ for TiN, TiO₂ for TiAlSiN, TiO₂ for AlCrTiSiN and Cr₂O₃ for AlCrN. It was found that AlCrTiSiN and AlCrN coatings, exhibited higher oxidation resistance than TiAlSiN and TiN coatings. From all of results, it revealed that the AlCrN coated end mills exhibited more excellent wear resistance than the uncoated, TiN coating, TiAlSiN coating and AlCrTiSiN coated end mills.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ในโอกาสที่ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ให้ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สำหรับผู้มีศักยภาพ ประจำปี 2554 เป็นระยะเวลา 2 ปี โดยยกเว้นค่าหน่วยกิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณสุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์ ผู้จัดการ และคุณเกษิณี เจ้าเหรียญพัฒนา ผู้จัดการจากบริษัทนาโนซิลด์ จำกัด โดยให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในด้านกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการวิจัยครั้งนี้

บริษัท CSM instrument สำหรับการอำนวยความสะดวกในการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการขีดขีด (Scratch tester) และเครื่องวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindenter)

คุณโมฆิต วงศ์ปิ่นแก้ว ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

คุณศรุต สุขสวัสดิ์และบริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด สำหรับการให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

คุณคมสัน ภายเดชและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 6) ซึ่งให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ตลอดจนญาติพี่น้องอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งบุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เจษฎา รุจิสมนภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุสารประกอบที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์.....	6
2.2 การเกิดการสึกหรอ.....	6
2.3 การเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition).....	9
2.4 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest.....	10
2.5 การทดสอบการสึกหรอ.....	10
2.6 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบของสารประกอบ.....	13
2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แบบ Glancing angle (Glancing Angle X-ray Diffraction, GAXRD).....	13
2.6.2 Scanning Electron Microscope (SEM)	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3	Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).....	15
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3	วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1	วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	19
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	19
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.1.3	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.2	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.2.1	การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ.....	38
3.2.2	การหาค่าความหนาของชั้นเคลือบ.....	39
3.2.3	ขั้นตอนการดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง.....	41
3.2.4	ขั้นตอนการดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ.....	42
3.2.5	การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด.....	42
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
4.1	ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ.....	43
4.1.1	ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน.....	43
4.1.2	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด.....	44
4.1.3	ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เกรด K10 ที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบไอระเหยทางฟิสิกส์.....	47
4.2	ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง.....	49
4.2.1	ผลการทดสอบการกัดผิว.....	50
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัด.....	52
4.2.3	ประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์.....	55
5	สรุปและข้อเสนอแนะการทดลองต่อไป.....	56
5.1	สรุป.....	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	5.2 ข้อเสนอแนะการทดลองต่อไป.....	57
	รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	การเขียนโค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC.....	62
ภาคผนวก ข.	ค่าความหนาของชั้นเคลือบจากการทดสอบ Calotest.....	65
ภาคผนวก ค.	ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation).....	67
ภาคผนวก ง.	ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด (Scratch test).....	73
ภาคผนวก จ.	ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบในระดับใช้งานจริง.....	75
ภาคผนวก ฉ.	คมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบหลังทดสอบกัดผิวเหล็กกล้า เครื่องมือเย็น เกรด D2 ที่ระยะทางการตัดต่างๆ	83
ภาคผนวก ช.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	102
	ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่าความหยาบเฉลี่ยของแผ่น WC-Co เกรด K10.....21
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2.....24
3.3	แสดงค่าความแข็งจากการวัดด้วย Rockwell Hardness Testing: Scale C (โดยวัดระยะห่างกันช่องละ 3 มม.).....25
3.4	ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....40
4.1	ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....44
ข.1	ค่าความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....66
ค.1	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....68
ง.1	ค่า Lc1 และ Lc2 โดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ เคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....74
จ.1	ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 1.....77
จ.2	ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2.....80

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ลักษณะของดอกกัด (End mill).....	3
2.1	สาเหตุของการเสื่อมประลัยของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม.....	8
2.2	ประเภทของการสึกหรอ.....	8
2.3	การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest.....	10
2.4	ลักษณะการสึกหรอต่างๆที่สามารถเกิดขึ้นได้.....	11
2.5	วิธีการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flank wear) ตามมาตรฐาน ISO 3685	11
2.6	แสดงลักษณะการทดสอบการสึกหรอ.....	12
2.7	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle.....	14
2.8	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.9	โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ TiAlN และ TiAlSiN.....	17
3.1	โครงสร้างจุลภาคของ WC-Co เกรด K10 ที่กำลังขยาย 1500x.....	20
3.2	ตำแหน่งและทิศทางการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด D2.....	24
3.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด D2 ก) ก่อนอบชุบ และ ข) หลังอบชุบ ที่กำลังขยาย40x.....	25
3.4	เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน.....	26
3.5	เครื่องวัดความหยาบพื้นผิวแบบใช้แสง.....	27
3.6	เครื่องอุตสาหกรรม.....	28
3.7	กระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200.....	28
3.8	เตาอบชิ้นงานแบบตั้งเดิม.....	29
3.9	เครื่องเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์.....	30
3.10	เครื่องกัดซีเอ็นซีี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 เครื่องวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindenter).....	31
3.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน (Scratch tester)	31
3.13 เตาอบแบบท่ออนอน (Tube furnace).....	32
3.14 เครื่อง Calotest.....	32
3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ.....	33
3.16 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	33
3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด.....	34
3.18 เครื่อง X-ray Diffraction.....	35
3.19 การดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง.....	36
3.20 การดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ.....	37
3.21 การหาความหนาชั้นเคลือบ.....	37
4.1 รอยหักงอจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN.....	45
4.2 ค่า Lc1 และ Lc2 ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....	46
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานต่อ การขีดข่วนของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN.....	46
4.4 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ.....	48
4.5 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ.....	48
4.6 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiAlSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

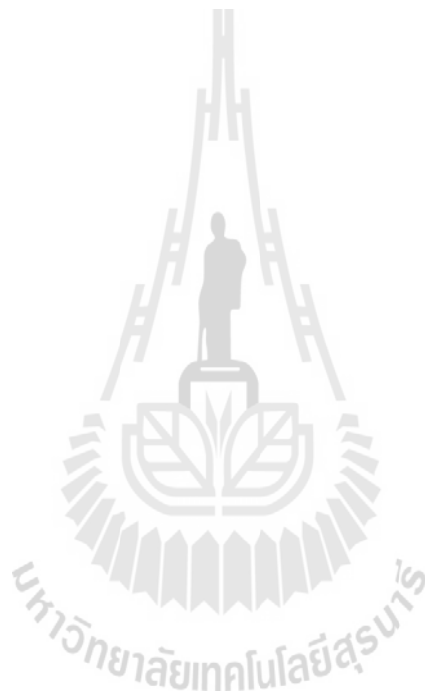
รูปที่	หน้า
4.7	XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ.....49
4.8	ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN ,AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น.....50
4.9	รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัด ก) ไม่เคลือบ ข) TiN ค) AlCrN ง) TiAlSiN และ จ) AlCrTiSiN หลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4 เมตร.....41
4.10	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัดของดอกกัด ที่ผ่านการเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN.....54
4.11	ประสิทธิภาพของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) หลังทดสอบกัดผิว.....55
ก.1	ทิศทางเคลื่อนที่ของดอกกัดสำหรับการใช้ในการทดสอบ.....64
ข.1	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....66
ค.1	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็ง โดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.....68
ค.2	ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์.....69
ค.3	ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์.....70
ค.4	ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์.....71
ค.5	ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์.....72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.1 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 1 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น.....	76
จ.2 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 2 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น.....	76
ฉ.1 คมตัดของดอกกัดก่อนการทดสอบกัดผิว.....	85
ฉ.2 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 0.5 เมตร.....	86
ฉ.3 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 1 เมตร.....	87
ฉ.4 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 1.5 เมตร.....	88
ฉ.5 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 2 เมตร.....	89
ฉ.6 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 2.5 เมตร.....	90
ฉ.7 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 3 เมตร.....	91
ฉ.8 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 3.5 เมตร.....	92
ฉ.9 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4 เมตร.....	93
ฉ.10 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4.5 เมตร.....	94
ฉ.11 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 5 เมตร.....	95
ฉ.12 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 5.5 เมตร.....	96
ฉ.13 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 6 เมตร.....	97
ฉ.14 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 6.5 เมตร.....	98
ฉ.15 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 7 เมตร.....	99
ฉ.16 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 7.5 เมตร.....	100
ฉ.17 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 8 เมตร.....	100
ฉ.18 คมตัดของดอกกัดหลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 8.5 เมตร.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.19	คมตัดของดอกกั๊ดหลังจากทดสอบกั๊ดผิวเป็นระยะทาง 9 เมตร.....101
ฉ.20	คมตัดของดอกกั๊ดหลังจากทดสอบกั๊ดผิวเป็นระยะทาง 9.5 เมตร.....101



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุสารประกอบที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เป็นวัสดุที่ผลิตด้วยกรรมวิธีการเผาประสาน (Sintering) โดยมีโคบอลต์เป็นตัวประสาน มีความแข็งและแข็งแรงสูง มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องมือ กลึง ไส ตัด เช่น ดอกกัด (End mill) ที่ใช้ในการกัดแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งสามารถกัดผิววัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น เหล็กกล้า เครื่องมือเย็น เกรด AISI D2 ที่ผ่านการอบชุบ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานเป็นเวลานานอาจเกิดการแตกร้าวเสียหาย และส่วนใหญ่มักเกิดการเสียดสี สูญเสียเนื้อโลหะที่ผิว นำไปสู่การสึกหรอ (Wear) ในที่สุด (Santhanam, A.T., Tierney, P., 1998; Bahadur, S., 1996) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีคุณภาพไม่เป็นไปตามต้องการ และเครื่องมือตัด เจาะมีอายุการใช้งานสั้นลง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเพื่อซ่อมแซม อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงพื้นผิว (Surface modification) โดยวิธีการปรับปรุงพื้นผิวแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่ คาร์บูไรซิ่ง (Carburizing) คาร์โบไนตรายด์ดิ่ง (Carbonitriding) ซึ่งมีมลภาวะสูง และอันตรายต่อผู้ใช้เพราะมีส่วนประกอบในอ่างเกลือหลอมเหลวเป็นไซยาไนด์ (Cyanide) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีกระบวนการอื่นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย เช่น พลาสมาไนตรายด์ดิ่ง (Plasma nitriding) การเคลือบด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) การเคลือบไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) และการเคลือบด้วยคาร์บอนที่มีสมบัติคล้ายเพชร (Diamond Like Carbon, DLC) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะอาด และปลอดภัย อย่างไรก็ตามเพื่อปรับปรุงและเลือกชนิดชั้นเคลือบที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้แก่ดอกกัด (End mill) ให้ดียิ่งขึ้น และอาจนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการผลิตต่อไปในอนาคตงานวิจัยนี้จึงได้จัดทำ โดยเลือกใช้กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ (PVD) บนวัสดุสารประกอบที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ซึ่งเป็นเกรดของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่นิยมใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือตัด โดยเลือกชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ อะลูมิเนียมโครเมียมไนตรายด์ (AlCrN), ไทเทเนียมไนตรายด์ (TiN), อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนตรายด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนตรายด์ (TiAlSiN) มาทำการเคลือบ ซึ่งทั้ง 4 ชนิดเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ โดยทดสอบ 2 แบบคือ

- 1.2.1 การทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ
 - การทดสอบค่าความแข็ง
 - การทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด
 - การทดสอบการเกิดออกซิเดชัน
- 1.2.2 ทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงด้วยการกัดผิว

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 ดอกกัดที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ โดยมีชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และ ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้กับดอกกัดได้

1.3.2 การสึกหรอของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ โดยมีชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) อาจมีพฤติกรรมการสึกหรอและการเกิดออกซิเดชันต่างกัน

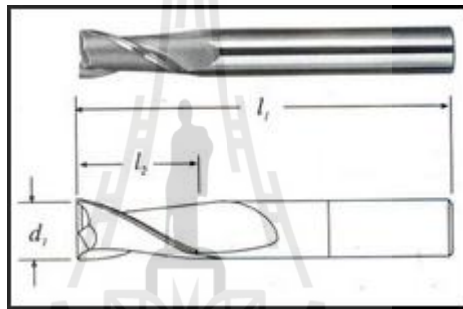
1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วัสดุที่ถูกเคลือบผิวหรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิว ที่เลือกศึกษาเป็นเกรดที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมโดยปรับแต่งตามความเหมาะสม ทั้งนี้วัสดุพื้นดังกล่าวมีรูปร่างพร้อมใช้งานเป็น

ก) ดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ชนิด 2-flute flat-end mill มีลักษณะดังรูปที่ 1.1 คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) ประมาณ 8 มิลลิเมตร ความยาวของใบมีด (L_2) ประมาณ 25 มิลลิเมตรและความยาวของดอกกัดทั้งหมด (L_1) 80 มิลลิเมตร เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอในสภาพไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) โดยใช้ดอกกัดดังกล่าวกัดผิวเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด D2

ข) แผ่นวัสดุที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เกรด K10 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และมีความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตรเพื่อใช้ศึกษาค่าความแข็งและความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ AlCrN, TiN, AlCrTiSiN และ TiAlSiN โดยทำการเคลือบลงบนแผ่นวัสดุแล้วนำไปทดสอบกับเครื่องวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindenter) และเครื่องทดสอบการขูดขีด (Scratch tester)

ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 304 ของบริษัท นาโนซีลด์ จำกัด มีความหนา 2 มิลลิเมตร ความกว้าง 12 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร เพื่อใช้วัดหาค่าความหนาของชั้นเคลือบ 4 ชนิด คือ AlCrN, TiN, AlCrTiSiN และ TiAlSiN โดยทำการเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วนำไปทดสอบกับเครื่อง Calotest



รูปที่ 1.1 ลักษณะของดอกกัด (End mill)

(Craftsman CNC, www, 2013)

1.4.2 นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 1.4.1 ไปเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) โดยชนิดของชั้นเคลือบที่สนใจศึกษามี 4 ชนิด คือ

- ก) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN)
- ข) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)
- ค) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และ
- ง) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN)

ซึ่งชั้นเคลือบ 4 ชนิดถูกเคลือบโดย บริษัท นาโนซีลด์ จำกัด

1.4.3 โดยชั้นเคลือบผิวแข็งทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ มีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้ คือ

- ก) ความหนาของชั้นเคลือบอยู่ระหว่าง 2-5 ไมครอน

ข) ความหยาบของพื้นผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (Roughness of substrate) เริ่มต้นควรกำหนดให้มีค่าคงที่เพราะความหยาบผิวมีผลต่อการยึดเกาะ (Adhesion) ของชั้นเคลือบที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกล เช่น ความแข็งและการสึกหรอ

1.4.4 ตัวอย่างชิ้นงานในข้อ 1.4.1 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ ตามหัวข้อ 1.4.2-1.4.3 แล้ว จะถูกวิเคราะห์ และศึกษาเกี่ยวกับชั้นเคลือบตามหัวข้อต่อไปนี้

ก) ทดสอบการสึกหรอ (Wear test) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- การทดสอบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เพราะให้ข้อมูลที่ใกล้เคียงมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในภาวะการใช้งานจริงมีตัวแปรที่ต้องจดบันทึก และกำหนดให้คงที่ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบและประมวลผล ดังนี้

- รอบการหมุน (Spindle revolution) 7000 รอบต่อนาที
- ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) 2.9 เมตรต่อวินาที
- รัศมีความลึกของการตัด (Radial depth of cut) 0.02 มิลลิเมตร
- ความลึกในการตัด (Depth of cut) 2 มิลลิเมตร
- ความยาวในการตัด (Cutting length) ในแต่ละครั้งที่ทำการวัด 500 มิลลิเมตร
- ชนิดของโลหะที่ถูกกัดคือ เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด AISI D2 ความแข็งประมาณ 58-62 HRC
- ชนิดของสารหล่อเย็น คือ น้ำมัน

ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการวัดค่าการสึกหรอทุกครั้งจากระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบรอบละ 500 มิลลิเมตร โดยวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flankwear) จากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนแปลง

- การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้เลือก

การทดสอบการขีดขีด (Scratch test) ชั้นเคลือบจะถูกหัวเพชรขูดลากไปด้วยความเร็วคงที่และมีการเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงแรงกระทำวิกฤติ (Critical load, L_c) ค่าหนึ่งชั้นเคลือบจะเริ่มเสียหายและโดยการตรวจจับของเซ็นเซอร์ต่างๆ ผู้ทำการวัดสามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ได้หลายระดับ เช่น ค่าแรงกระทำวิกฤติเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (First delamination, L_{c1}) และค่าแรงกระทำวิกฤติเริ่มต้นในการหลุดลอกสมบูรณ์ (Full delamination, L_{c2}) เป็นต้น ซึ่งค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของชั้นเคลือบโดยสมบูรณ์ (Full delamination, L_{c2}) เป็นค่าที่ทางอุตสาหกรรมให้ความสำคัญสูงสุดเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ และอายุการใช้งาน

การวัดค่าความแข็งชั้นเคลือบในระดับนาโน (Nano indentation test) ในการหาค่าความแข็ง (H_{IT}) ใช้หัวกดโดยส่วนใหญ่ทำจากเพชร กดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยเพิ่มแรงกดบนผิวชั้นเคลือบจนชั้นเคลือบไม่สามารถทนแรงกดได้อีกจึงหยุด ผลการทดสอบแสดงในรูปความแข็งซึ่งวิเคราะห์จากแรงที่กระทำสูงสุด (P_{max}) และพื้นที่สัมผัสที่สนใจ (A_p) ดังสมการคือ $H_{IT} = P_{max}/A_p$ ผู้ใช้สามารถปรับขนาดแรงกดในการทดสอบตามความเหมาะสมได้

ข) ทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเกิดออกไซด์ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

ค) ทดสอบค่าการสึกหรอและลักษณะของชั้นเคลือบโดย กล้องจุลทรรศน์แบบ สเตอริโอ (Stereo microscope, SM) และ X-ray Diffraction (XRD) ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอและการทดสอบการเกิดออกซิเดชันในข้อ ก) และ ข)

ง) วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์

1.5.2 ทราบถึงความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์

1.5.3 ทราบถึงความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบแต่ละชนิดระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุพื้นผิวที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

1.5.4 ในเชิงอุตสาหกรรม ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้มีผลประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposited)

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย วัสดุสารประกอบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เกิดการสึกหรอหรือการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition) การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest การทดสอบการสึกหรอและการวิเคราะห์ชั้นเคลือบของสารประกอบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 วัสดุสารประกอบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

วัสดุสารประกอบที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เป็นวัสดุที่ผลิตด้วยกรรมวิธีการเผาประสาน (Sintering) โดยมีโคบอลต์เป็นตัวประสาน มีความแข็งและแข็งแรงสูง คงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมผลิตเป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องมือ กลึง ไส ตัด เจาะ เช่น ดอกกัด (End mill) ที่ใช้ในการกัดแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น โดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค, ขนาดเกรน และตัวประสาน สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีเฉลี่ยคือ 6 เปอร์เซ็นต์ของโคบอลต์และ 94 เปอร์เซ็นต์ของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Santhanam, A.T., Tierney, P., 1998) เพราะเป็นเกรดที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม

2.2 การเกิดการสึกหรอ

การสึกหรอ คือ พฤติกรรมการสูญเสียเนื้อโลหะเนื่องจากการใช้งานของโลหะโดยมีการสัมผัสกับโลหะชนิดอื่น ทั้งนี้การสูญเสียเนื้อโลหะดังกล่าว ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานของชิ้นส่วนดังกล่าวลดลง และสุดท้ายอาจนำไปสู่การแตกหักเสียหายได้ โดยปกติการสึกหรอสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1) การสึกหรอเนื่องจากการขีดข่วน (Abrasion wear) มักเกิดจากการใช้งานชิ้นส่วนทางวิศวกรรมไปสัมผัสกับอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มีความแหลมคม ทำให้เกิดรอยขีดข่วนผิว

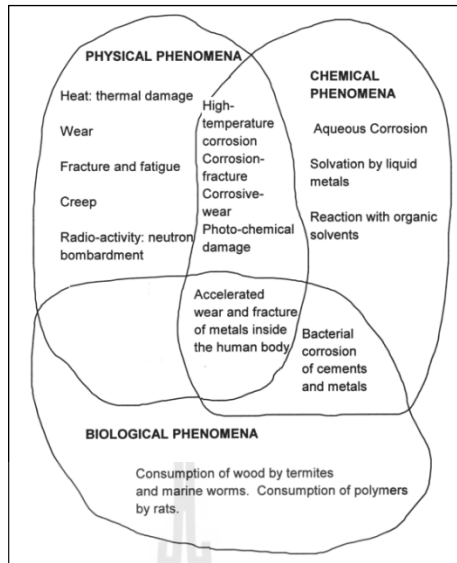
2) การสึกหรอเนื่องจากการเซาะ (Erosion wear) โดยปกติมักเกิดจากการใช้งานชิ้นส่วนทางวิศวกรรมสัมผัสกับของไหลที่มีอนุภาคนขนาดเล็กแขวนลอย โดยสาเหตุสำคัญของการสึกหรอคืออนุภาคนขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในของไหล ไหลปะทะชนผิวของวัสดุ ทำให้เกิดความเค้น-

ความเครียดสะสมบริเวณดังกล่าว เมื่อถึงจุดหนึ่งที่วัสดุไม่สามารถทนต่อแรงพุ่งชนต่อไปได้ วัสดุจึงหลุดลอกออก

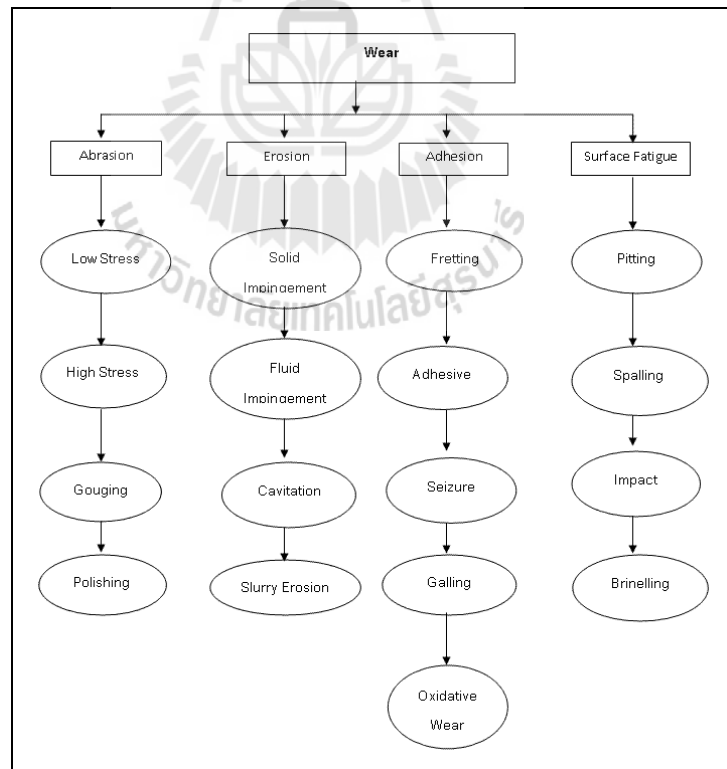
3) การสึกหรอเนื่องจากการเกาะติด (Adhesion wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการใช้งานวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปสัมผัสกันควบคู่ไปกับการเคลื่อนที่แล้วทำให้เกิดความร้อนในบริเวณผิวสัมผัส ทำให้เกิดการหลอมติดกันและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ในบริเวณดังกล่าว อย่างไรก็ตามบริเวณดังกล่าวมักอ่อนแอ และหลุดล่อนออกจากก้อนเนื้อวัสดุไปในที่สุด

4) การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Surface fatigue wear) เกิดจากการได้รับแรงกระทำสลับตัวอย่างเช่น ในกรณีล้อรถยนต์ โดยเฉพาะบริเวณก้านและเส้นรอบวงล้อ จังหวะที่รถยนต์เคลื่อนที่ตำแหน่งของก้านและเส้นรอบวงล้อได้รับแรงจากน้ำหนักกรร และเคลื่อนที่สัมผัสกับถนนเป็นระยะเวลาหนึ่ง แต่เมื่อเคลื่อนที่ถัดไป ตำแหน่งของก้านและเส้นรอบวงล้อเดิมเกิดการคลายตัวหรือได้รับแรงกระทำลดลง อย่างไรก็ตามลักษณะการรับแรงดังกล่าว กระทำซ้ำๆ จึงทำให้ล้อเกิดความล้าไปพร้อมๆกับการเสียดสี จึงทำให้เกิดความเสียหายประเภทการสึกหรอจากความล้าขึ้น

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมไม่ได้เกิดการเสียหายเพียงเพราะการสัมผัสกันเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงตัวแปรอื่นๆที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ชิ้นงานได้รับแรงกระทำทางกลด้วย เช่น เมื่อเกิดการเสียดสีไปนานๆ หรือใช้ชิ้นงานตัดเฉาะไปนานๆ ย่อมเกิดความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นทั้งแรงทางกลและความร้อนจะเป็นตัวแปรสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดความเสียหาย ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเสื่อมประลัยของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมแสดงดังรูปที่ 2.1 และจากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรต่างๆแล้วทำให้จำแนกรายละเอียดการสึกหรอได้ละเอียดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 สาเหตุของการเสื่อมประลัยของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม (Batchelor,A. W., Lam,L. N., Chandrasekaran,M., 1999)



รูปที่ 2.2 ประเภทของการสึกหรอ (Bahadur, S., 1996)

ข้อดีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ คือ ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียดสีและการสึกหรอให้กับแม่พิมพ์ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนให้กับแม่พิมพ์เพิ่มอายุการใช้งานให้กับแม่พิมพ์ สามารถเพิ่มอัตราการผลิตและความเร็วในการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ ลดการหลอมเชื่อมระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานและสามารถลดเวลาในการซ่อมบำรุงรักษาแม่พิมพ์ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบมีสีมันสวยงามเพิ่มมูลค่าทางการค้าได้อีกด้วย

2.3 การเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition)

คือ การเคลือบผิวชิ้นงาน (Substrate) ด้วยชั้นผิวเคลือบที่บาง โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความแข็งสูง ต้านทานต่อการเสียดสี ต้านทานต่อการสึกหรอ ต้านทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น ซึ่งจะเหมาะกับงานที่ต้องการชั้นผิวบาง ซึ่งหลักการคือวัสดุถูกทำให้กลายเป็นไอจากของแข็งหรือของเหลว เกิดเป็นอะตอมหรือโมเลกุล พลาสมา และไอออน แล้วไปเคลือบบนผิวชิ้นงาน (Substrate) ภายใต้สุญญากาศหรือที่ความดันแก๊สต่ำ ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์สามารถแบ่งได้ 4 ประเภทหลัก คือ

1) Vacuum deposition บางครั้งอาจเรียก Vacuum evaporation กระทำโดยการนำเอาวัสดุต้นกำเนิดของชั้นเคลือบ ไปให้ความร้อนภายใต้สุญญากาศ (10^{-5} Torr or 10^{-9} Torr) ทำให้เกิดการระเหยของอะตอม หรือ โมเลกุลแล้วเคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate)

2) Sputter deposition อะตอมของวัสดุเคลือบจะถูกขับออกมาโดยอาศัยอะตอมที่มีพลังงานสูงโดยภายในห้องเคลือบจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นจะปล่อยแก๊สอาร์กอน วัสดุเคลือบ (Target) จะถูกทำให้เป็นขั้วลบ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประจุบวกแก๊สอาร์กอน (Ar^+) จะถูกปล่อยออกมา Ar^+ จะถ่ายเทโมเมนตัมให้วัสดุเคลือบ กระตุ้นให้วัสดุเคลือบปล่อยอะตอมออกมา อะตอมที่ปล่อยออกมาจะเคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate)

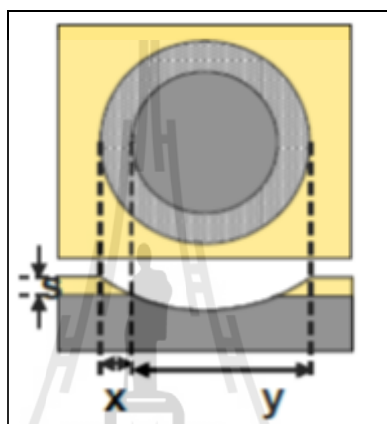
3) Ion plating เป็นการระดมยิงอะตอมที่มีขนาดเล็กเท่าอนุภาคที่มีพลังงานในการเปลี่ยนแปลงและควบคุมคุณสมบัติของชั้นฟิล์มที่สะสม ซึ่งกระบวนการนี้พลังงาน ฟลักซ์และมวลที่ระดมยิงพร้อมกับอัตราการยิง จะมีความสำคัญ ในกระบวนการ Ion plating สามารถทำได้ในสถานะแวดล้อมพลาสมาหรือในสถานะสุญญากาศ ฟิล์มที่ได้จะมีความแน่นยึดเกาะได้ดี

4) Cathodic arc deposition เป็นวิธีที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง ใช้แรงดันไฟฟ้าในการอาร์กให้เป็นไอต่ำ เป้าแคโทดจะถูก Ionized ให้กลายเป็นไอและวัสดุชิ้นงานจะถูกทำให้เอียงเพื่อให้เกิดการเร่งไอออน (Mattox., D. M., 1998)

โดยในงานวิจัยนี้เลือกวิธีการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ประเภท Cathodic arc deposition โดยมีบริษัท นาโนซิลด์ จำกัด เป็นผู้ทำการเคลือบให้

2.4 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest

ในการวัดหาความหนาของชั้นเคลือบวิธี Calotest คือ วิธีการวัดตามมาตรฐาน ISO EN 1071 เป็นวิธีหนึ่งที่มีใช้กันทั่วไปเนื่องจากใช้ง่ายและค่าใช้จ่ายไม่แพง โดยหลักการการทำงานของ Calotest จะใช้หัวบอลทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30 มิลลิเมตร หมุนกดลงบนผิวชั้นเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ซึ่งตำแหน่งของรอยกดทรงกลมจะสัมพันธ์ต่อชั้นงานและแรงกดที่มีค่าคงที่โดยจะกดลงไปให้เกิดรอยหลุมไม่เกินครึ่งลูกบอลทรงกลม ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest

จากนั้นจึงตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อวัดค่าตัวแปร X และ Y แล้วจึงนำมาเข้าสู่สมการดังนี้

$$S = \frac{xy}{\varnothing}$$

โดยที่

S คือ ความหนาของชั้นเคลือบ

\varnothing คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล

เพื่อหาค่าความหนาของชั้นเคลือบดังรูปที่ 2.3 (CSM instrument, www, 2012)

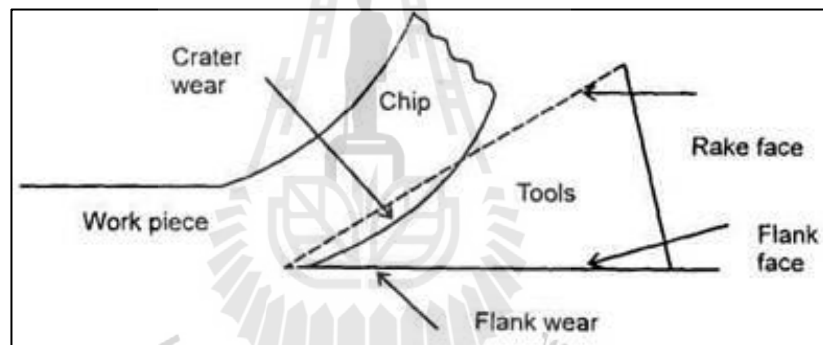
2.5 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอมีหน้าที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

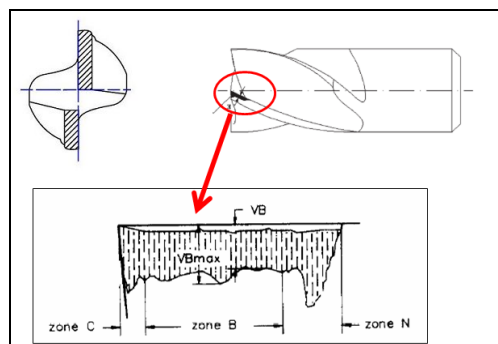
2.5.1 เพื่อจัดลำดับของวัสดุและสารหล่อลื่นตามประสิทธิภาพการใช้งาน ในสถานะการทดสอบที่กำหนดโดยมีความเที่ยงตรงและการทำซ้ำได้ (Reproducibility) ในระดับที่สามารถ

ยอมรับได้ เมื่อเลือกได้วัสดุหรือสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว จึงนำไปทดสอบภาคสนาม ในการใช้งานจริงอีกครั้ง

การสึกหรอของเครื่องมือกลึง ไส ตัด เจาะ มีหลายรูปแบบที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จากการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.4 สำหรับการทดสอบใช้งานจริงในงานวิจัยนี้ได้เลือกทดสอบ โดยการกัด ผิวงานหนักเครื่องมือเย็นเกรด D2 ด้วยเครื่อง CNC โดยทำการศึกษาค่าการสึกหรอของดอกกัด (End mill) จากคมตัดที่สึกหรอ (Flank wear) ดังในรูปที่ 2.5 โดยหลังจากการกัดผิวไปแล้วแต่ละรอบจะทำการวัดค่าการสึกหรอจากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนไปด้วยค่าเฉลี่ย V_B และ V_{max} ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งหากค่าการสึกหรอของคมตัดมากกว่า 0.25-0.38 มิลลิเมตร ผิวงานที่ถูกกัดจะเริ่มมีความหยาบที่ผิวมากขึ้น (Santhanam, A.T., Tierney, P. 1998) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้วิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3685 โดยที่อายุการใช้งาน (Tool life criterion) ของดอกกัดตามมาตรฐาน ISO 3002/1 อยู่ที่ไม่เกิน $V_{Bmax} \leq 200 \mu m$

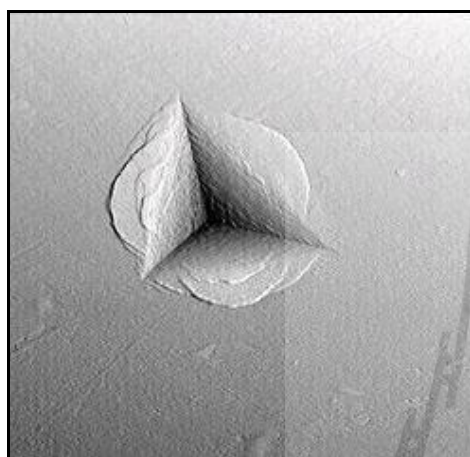


รูปที่ 2.4 ลักษณะการสึกหรอต่างๆที่สามารถเกิดขึ้นได้ (Ululu Team, www, 2013)

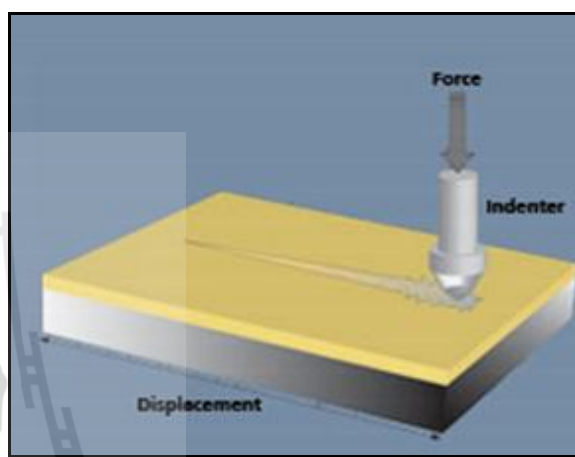


รูปที่ 2.5 วิธีการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flankwear) ตามมาตรฐาน ISO 3685 (Santhanam, A.T., Tierney, P., 1998)

2.5.2 สามารถนำความเสียหายจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการทดลองมาทำการศึกษา โดยมีจุดประสงค์ในการสร้างความรู้ความเข้าใจถึงกลไกของการสึกหรอ นอกจากนี้ การทดสอบและเก็บข้อมูลการทดลองในแต่ละช่วงเวลาเพื่อติดตามการเคลื่อนไหวของกลไกการสึกหรออย่างใกล้ชิด ก็สามารถทำได้ในห้องทดลอง ซึ่งการทดลองในลักษณะนี้จะไม่สามารถทำได้ในการทดสอบภาคสนามหรือการใช้งานจริง



(ก) ลักษณะการทดสอบ Nanoindentation



(ข) ลักษณะการทดสอบ Scratch test

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการทดสอบการสึกหรอ (Wikipedia, www, 2012; CSM instrument, www, 2012)

การทดสอบการสึกหรอในระดับห้องปฏิบัติการ (เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก) นิยมตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Scratch tester และ Nano indentation เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความต้านทานการขูดขีดและความแข็งของชั้นเคลือบดังรูปที่ 2.6 โดยสามารถใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด เช่น เซรามิก โลหะ และผิวเคลือบต่างๆ ซึ่งมีหลักการดังนี้

- การทดสอบ Scratch tester

โดยชั้นเคลือบจะถูกหัวเพชรขูดลากไปด้วยความเร็วคงที่และมีการเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงแรงกดวิกฤติ (Critical load, L_c) ค่าหนึ่ง ชั้นเคลือบจะเริ่มเสียหายและด้วยการตรวจจับของเซ็นเซอร์ต่างๆ ผู้ทำการวัดสามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ได้หลายระดับ เช่น ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (First delamination, L_{c1}) และค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกสมบูรณ์ (Full delamination, L_{c2}) เป็นต้น จนถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของชั้นเคลือบโดยสมบูรณ์ ซึ่งค่าสุดท้ายนี้ทางอุตสาหกรรมถือว่ามีความสำคัญสูงสุด

- การทดสอบ Nano indentation

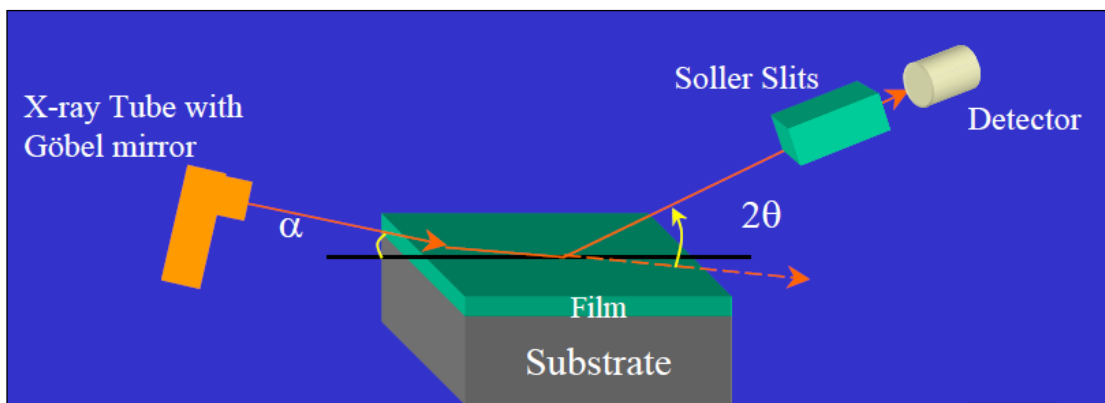
ในการหาค่าความแข็ง (H_{IT}) ใช้หัวกดโดยส่วนใหญ่ทำจากเพชร กดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยเพิ่มแรงกดจนผิวชั้นเคลือบจนชั้นเคลือบไม่สามารถทนแรงกดได้อีกจึงหยุด ผลการทดสอบแสดงในรูปความแข็งซึ่งวิเคราะห์จากแรงที่กระทำสูงสุด (P_{max}) และพื้นที่สัมผัสที่สนใจ (A_p) ดังสมการคือ $H_{IT} = P_{max}/A_p$ โดยผู้ใช้สามารถปรับขนาดแรงกดในการทดสอบตามความเหมาะสมได้ (สุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์., 2008; Wikipedia, www, 2012; ปนัดดา นิรินาทล้ำ พงศ์.,2547)

2.6 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบของสารประกอบ

สำหรับการวิเคราะห์ชั้นเคลือบในการวิจัยครั้งนี้จะเลือกทำการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ซึ่งสามารถอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle (Glancing Angle X-ray Diffraction, GAXRD)

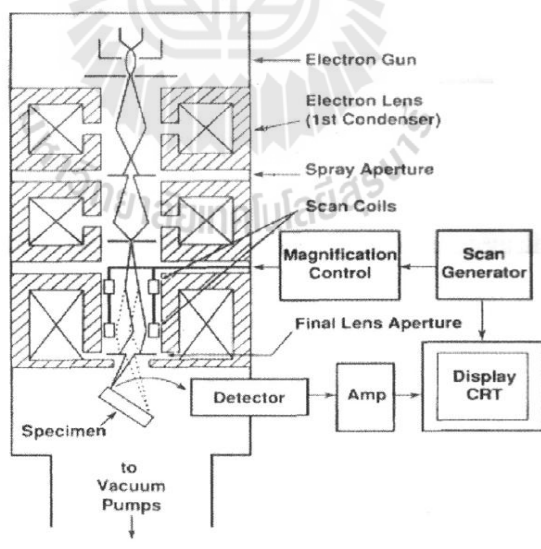
เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการเดียวกันกับการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทั่วไปแต่ในการวิเคราะห์ชั้นเคลือบสารประกอบชนิดฟิล์มบาง (Thin film) จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle ซึ่งมีหลักการคือ เป็นการกำหนดให้มุม incidence (α_i) ของรังสีเอกซ์ที่จะตกกระทบมีมุมแคบลงหรือเป็นการทำให้มุมตกกระทบเกิดการเฉียงนั่นเอง ดังนั้นดัชนีหักเห (Refractive Index) ที่ได้จะน้อยกว่าเอกภาพ (Unity) ซึ่งการสะท้อนรังสีที่ยังตกกระทบจากด้านนอกทั้งหมดจะเกิดต่ำกว่ามุมวิกฤต (α_c) (Spring-8. www. 2012.) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle (Spring-8, www, 2012)

2.6.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีความสำคัญในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นเคลือบได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีขีดความสามารถในการตรวจสอบได้ละเอียด หลักการทำงานโดยสังเขปของSEM แสดงในรูปที่ 2.8 (Toya, T., Jotaki, R., Kato, A., 1986; แม้นอมรสิทธิ์., 2535)



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความ

ต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0–50 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอปเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆเหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไปตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons , BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่างและแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวนอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้นเช่นเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), Auger electron เป็นต้นซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.6.3 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับการใช้งานเครื่อง SEM โดยหลังจากการที่พื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดการ excite อิเล็กตรอนชั้นใน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นเกิดเป็นช่องว่าง โดยอิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีพลังงานสูงกว่าจะมาเติมเต็มอิเล็กตรอนที่หายไปและเมื่อเกิดการ excite ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูป Characteristic X-ray จากนั้นจึงนำมาประมวลผล ซึ่งในงานวิจัยใช้เทคนิค EDS สำหรับวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด (แมนอมรสิทธิ์.,2535; Toya, T., Jotaki,R., Kato,A.,1986)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

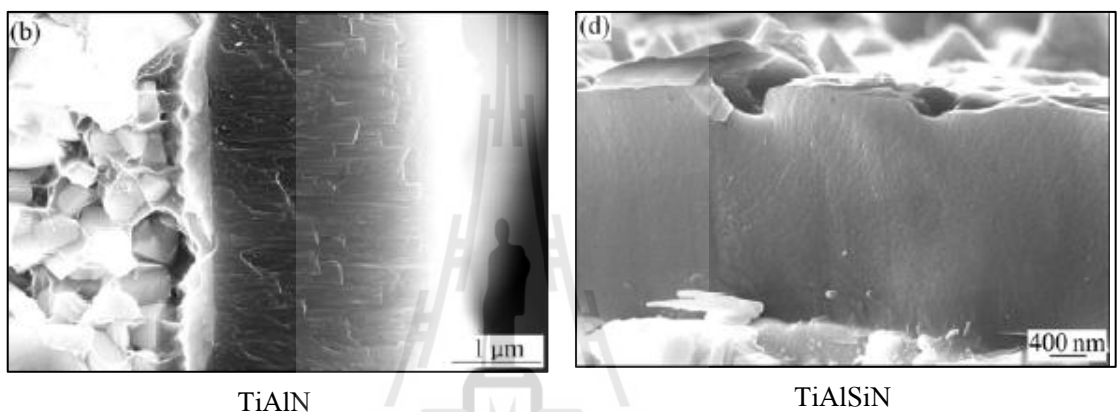
สำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลวารสารทางวิชาการที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งวารสารเหล่านี้จะช่วยทำให้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์และสามารถทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยครั้งนี้ได้อย่างถูกต้องโดยเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย งานวิจัยทางด้านการสึกหรอและการเกิดออกซิเดชันซึ่งอธิบายรายละเอียดดังนี้

Aykut, S. et al. (2007) พร้อมด้วยคณะ ได้ศึกษาผลของแรงในการตัด (Cutting force) และความเร็วในการตัด (Cutting speed) ที่มีผลต่อรูปร่างของขี้กิ้งและพื้นผิวของวัสดุที่ถูกกลึง พบว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดสูงขึ้นตามแรงและความเร็วในการตัด และพื้นผิวของวัสดุที่ตัดหยาบมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวได้เปรียบเทียบกับชิ้นงานไบตัดที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบผสมหลายชั้น ที่ประกอบด้วย TiN, (TiAl)N และ Ti(C,N) สลับกัน พบว่าไบตัดมีอายุการใช้งานมากขึ้นและพื้นผิวของวัสดุที่ถูกกลึง ตัด เรียบขึ้น นอกจากนี้ Gaitan, G. B. et al (2007) และ Mummaw, C. et al (2008) ได้ศึกษาการยึดอายุการใช้งานของเครื่องมือกลึง ใส ด้วยชั้นเคลือบหลายชั้นสลับกัน พบว่าชั้นเคลือบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการสึกหรอ เพราะช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

Holmberg, K. et al (2000) และ Astakhov, V. P. et al (2011) ทำการทดลองศึกษาเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอเครื่องมือกลึง ใส ตัดเจาะ พบว่า อุปกรณ์ดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานนานยิ่งขึ้นหากมีการใช้สารหล่อเย็น (Coolant) ที่เหมาะสม อนึ่งมีงานวิจัยยืนยันว่าการใช้วิธีเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์บนชิ้นงาน (Substrate) เหล็กกล้าเครื่องมือต่างๆสามารถช่วยต้านทานพฤติกรรม การสึกหรอได้ดี แต่หากใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของชั้นเคลือบอาจมีผลกระทบต่อชั้นเคลือบได้ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นเคลือบนั้นๆเช่นกันจากการวิจัยพบว่า ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500-1150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นเคลือบชนิด โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และ โครเมียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (CrAlN) เช่นการเกิดออกไซด์ที่สภาวะปกติ (มีออกซิเจน) การยึดเกาะ (Adhesion) ของชั้นเคลือบกับชิ้นงาน (Substrate) อาจลดลง เป็นต้น

Stan, V. et al. (2005) การเพิ่มซิลิกอนลงในชั้นเคลือบจะช่วยทำให้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนที่เพิ่มลงไปถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้น amorphous ของซิลิกอนไนไตรด์ (amorphous Si₃N₄) มีผลทำให้เกรนมีความละเอียดขึ้น

Yu, D. et al. (2009) และ Wang, S.Q. et al (2011) ได้ศึกษาชั้นเคลือบไทเทเนียม อะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) พบว่า การเพิ่มซิลิกอนลงในชั้นเคลือบไทเทเนียม อะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) สามารถเพิ่มความแข็งได้สูงขึ้นเนื่องจากธาตุซิลิกอนจะถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้น amorphous ในรูปของซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยผลึกของ TiAlN ในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เกรนจึงละเอียดขึ้นส่งผลให้มีขอบเกรนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงถูกยับยั้ง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ TiAlN และ TiAlSiN (Wang, S.Q., 2011)

Nurot, P. et al. (2012) ได้พัฒนาชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิลิกส์แบบ Cathodic arc deposition และทำการศึกษาคคุณสมบัติของชั้นเคลือบชนิดนี้ พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่า L_c สูงความสามารถยึดเกาะกับวัสดุพื้นได้ดีและมีความแข็งของชั้นเคลือบสูงมากถึง 50 GPa

Leyland, A., Matthews, A. (2000) ชั้นเคลือบไอระเหยทางฟิลิกส์ที่มีค่าความแข็งมากจะบอกถึงความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี

Mo, J.L., Zhu, M.H. (2009) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) และ อะลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlTiN) ด้วยการทดสอบแบบ Ball on disc พบว่า เมื่อชั้นเคลือบได้รับแรงกระทำเป็นเวลานานในสิ่งแวดล้อมที่มีออกซิเจนร่วมจะเริ่มปรากฏออกไซด์ขึ้นและยังพบว่าออกไซด์ของธาตุไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ที่เกิดขึ้นให้ผลที่แตกต่างกัน สำหรับออกไซด์ฟิล์มของอะลูมิเนียมและโครเมียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการ

กระทบบร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการเพิ่มการสึกหรอและความเสียหาย

Shane, Y. H., Yucheng, D. (2001) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการตัด (Cutting temperature) เทียบกับความเร็วในการตัด (Cutting speed) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัดจะมีผลให้อุณหภูมิบริเวณอัตรากั้น (Interface) ระหว่างคมตัดและชิ้นงานเพิ่มขึ้น ถึงแม้จะใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดก็ตาม ซึ่งอุณหภูมิในการตัดจะสูงถึง 920 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการตัด 2.5 เมตรต่อวินาทีโดยงานวิจัยในครั้งนี้ใช้ความเร็วในการตัด 2.9 เมตรต่อวินาที

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำการทดสอบในภาคการใช้งานจริง บ้างทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ โดยขาดการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างผลของห้องปฏิบัติการและภาคการใช้งานจริงว่ามีข้อเหมือนและต่างเช่นไร อนึ่งวิธีการทดสอบการสึกหรอมีหลายระดับให้เลือกตามความเหมาะสม และสภาวะการดำเนินงานจริงของชิ้นส่วนนั้นๆ ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนมีความเห็นว่าการทดสอบทั้งสองระดับควรจัดให้มีขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ และอาจเป็นแนวทางต่อไปในอนาคต

นอกจากนี้รายงานในวรรณกรรมข้างต้น พบว่าการเคลือบชิ้นส่วนเครื่องมือกลึง ใส คัดเจาะด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ ชนิดของชั้นเคลือบแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในการใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ ระยะเวลา และแรงที่กระทำ ซึ่งมีผลต่อชั้นเคลือบอย่างมากดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิจัย และสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอนาคต

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

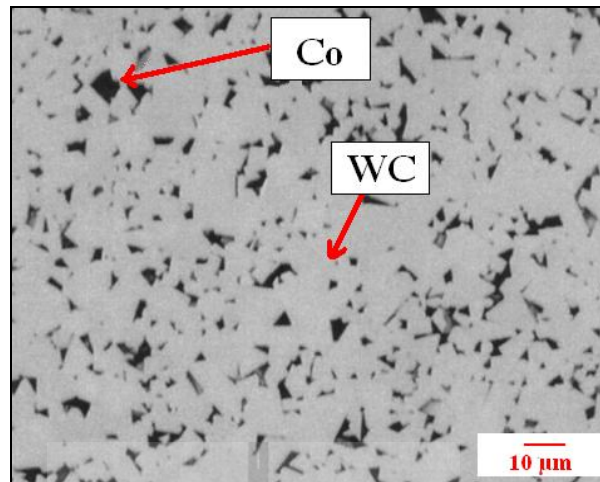
วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์โดยชนิดของชั้นเคลือบประกอบด้วย คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) และอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) มีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1.1 วัสดุที่ถูกเคลือบผิวหรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิว ซึ่งเป็นเกรดที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม คือ ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เกรด K10 โดยวัสดุพื้นที่ใช้จะแบ่งเป็นรูปร่าง 2 แบบ เพื่อการทดสอบที่ต่างกัน ดังนี้

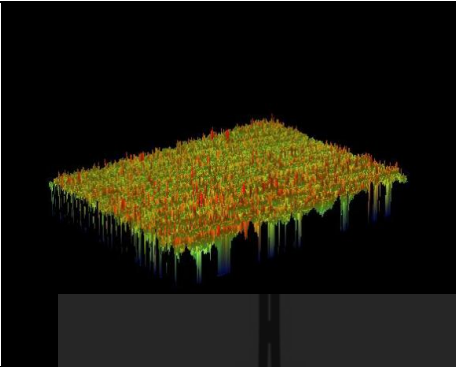
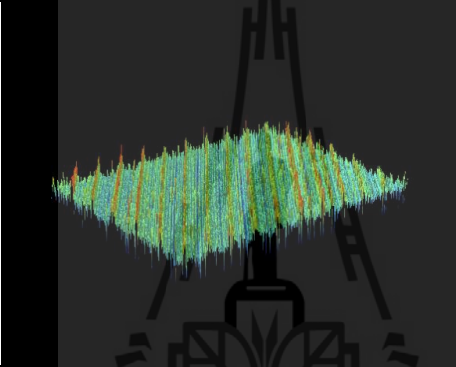
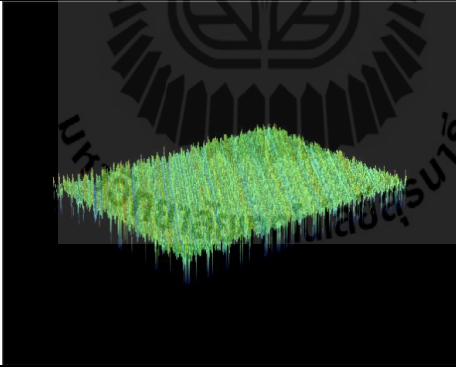
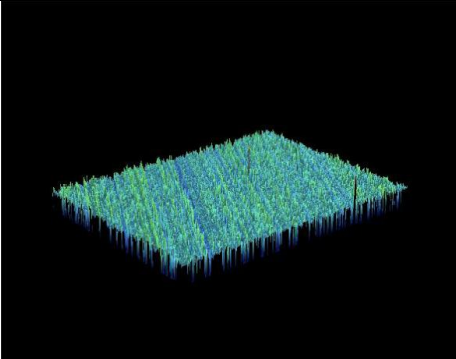
3.1.1.1.1 ดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เกรด K10 มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ คือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโคบอลต์และ 94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทังสเตนคาร์ไบด์ โดยมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะดอกกัดเป็นชนิด หัวกัดแบบแบนมี 2 ฟัน (2-flute flat-end mill) และขนาดรูปทรงมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) ประมาณ 8 มิลลิเมตร ความยาวของใบมีด (L_2) ประมาณ 25 มิลลิเมตรและความยาวของดอกกัดทั้งหมด (L_1) 80 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นงานดอกกัดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จำนวน 5 ชิ้น โดยแบ่งเป็นดังนี้ดอกกัดไม่ถูกเคลือบ (Uncoated) ดอกกัดที่ถูกเคลือบผิวมีชั้นเคลือบคือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) และอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) ซึ่งดอกกัดทั้งหมดที่กล่าวมา จะนำไปทดสอบโดยการกัดผิวเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด D2 เพื่อตรวจสอบความคงทนและต้านทานการสึกหรอ ซึ่งจัดเป็นการทดสอบจากการใช้งานจริง ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการวัดค่าการสึกหรอทุกครั้งจากระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบรอบละ 500 มิลลิเมตร จนเกินช่วงอายุการใช้งาน (Tool life)

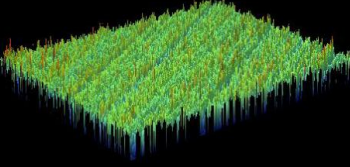
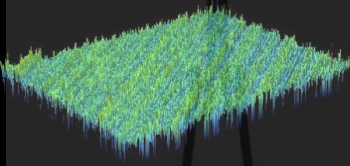
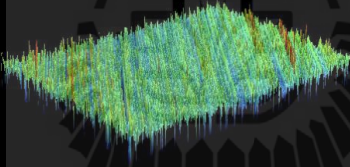
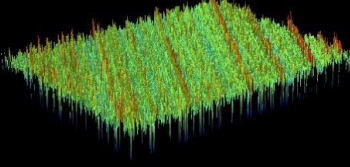


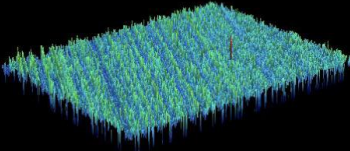
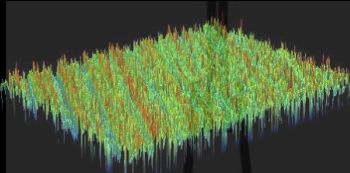
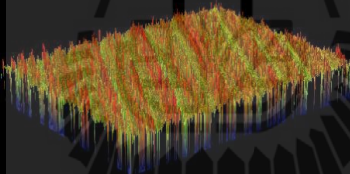
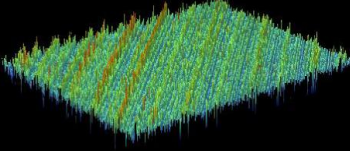
รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของ WC-Co เกรด K10 ที่กำลังขยาย 1500x

3.1.1.1.2 แผ่นวัสดุที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และมีความหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทดสอบการวัดความแข็งระดับนาโนและการทดสอบด้านทานต่อการขีดขีดโดยชิ้นงานมีค่าความหยาบเฉลี่ยดังตารางที่ 3.1 จำนวนแผ่นวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นจำนวน 15 ชิ้น โดยแบ่งเป็นดังนี้ แผ่นวัสดุไม่ถูกเคลือบ (Uncoated) แผ่นวัสดุที่ถูกเคลือบผิวมีชั้นเคลือบดังนี้คือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN อย่างละ 3 ชิ้น

ตารางที่ 3.1 ค่าความหยาบเฉลี่ยของแผ่น WC-Co เกรด K10

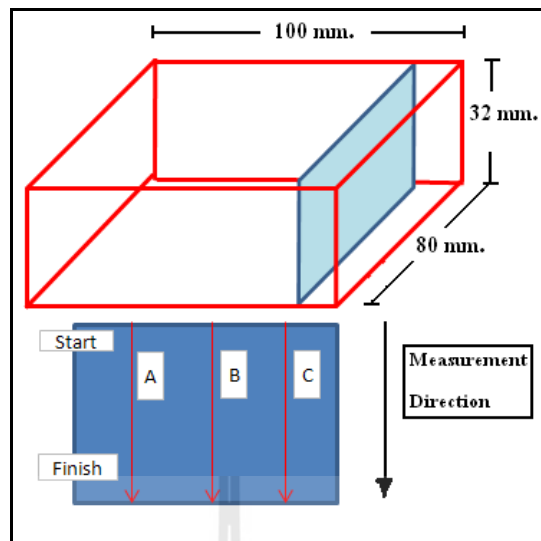
ชั้นที่	ภาพ 3 มิติแสดงพื้นผิว	ความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra, nm)
1		93.05
2		107.00
3		113.33
4		116.07

5			109.49
6			107.13
7			95.37
8			105.06

9				118.88
10				116.71
11				93.86
12				97.27

3.1.1.1.3 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 304 ของบริษัท นาโนซีลด์ จำกัด ใช้สำหรับทดสอบ Calotest เพื่อหาความหนาของชั้นเคลือบ

หมายเหตุ ชั้นเคลือบไอระเหยทางฟิสิกส์ทั้ง 4 ชนิดถูกเคลือบให้โดยบริษัท นาโนซีลด์ จำกัด

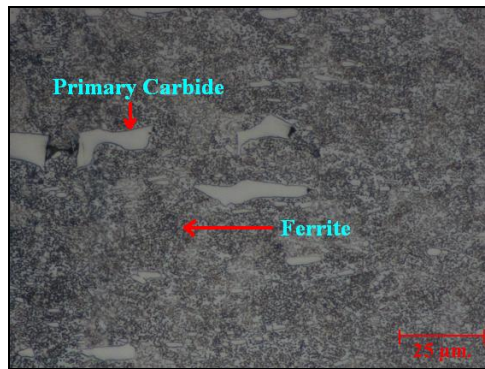


รูปที่ 3.2 ตำแหน่งและทิศทางการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด D2

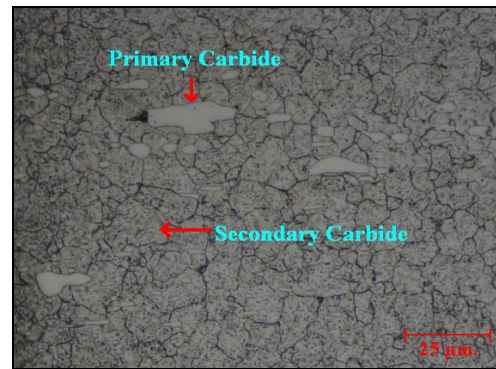
3.1.1.2 วัสดุที่ถูกใช้สำหรับกัดผิวเพื่อใช้ทดสอบการสึกหรอในสภาวะการใช้งานจริงได้เลือกเป็น เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2 โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบกัดผิวจะมีขนาดความหนา 32 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร ทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดค่าความแข็งก่อนอบชุบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Hardness Testing: Scale C โดยวิธีการวัดความแข็งตามรูปที่ 3.2 ซึ่งได้ค่าความแข็งก่อนการอบชุบดังตารางที่ 3.3 มีโครงสร้างจุลภาคก่อนอบชุบดังรูปที่ 3.3ก.

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 (ถูกตรวจสอบให้โดยบริษัท ไทยโตเคน เทอร์โม จำกัด)

โลหะ	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	%C	%Cr	%V	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
D2	1.7	13.3	0.01	0.85	0.16	0.23	Bal.



ก)



ข)

รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด D2 ก) ก่อนอบชุบ และ ข) หลังอบชุบ ที่กำลังขยาย 40x

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความแข็งจากการวัดด้วย Rockwell Hardness Testing: Scale C (โดยวัดระยะห่างกันช่องละ 3 มม.)

ตำแหน่งที่	A		B		C	
	ชิ้นงาน ก่อนชุบ แข็ง	ชิ้นงาน หลังชุบ แข็ง	ชิ้นงาน ก่อนชุบ แข็ง	ชิ้นงาน หลังชุบ แข็ง	ชิ้นงาน ก่อนชุบ แข็ง	ชิ้นงาน หลังชุบ แข็ง
1 (Start)	19.2	58.5	20.2	58.2	19.7	58
2	20.1	57.9	20.8	58.2	19.2	58.2
3	20.6	58.4	19.2	58.9	20.1	58.4
4	20.4	58.9	19.1	57.8	19.9	58.4
5	19.9	58.1	18.9	58.3	20.9	58
6	19.3	58.1	20.8	57.4	19.2	58.9
7	19.8	57.5	19.6	58.9	19.7	57.9
8	19.8	58.4	19.9	58	20.1	57.6
9	21	58.8	20.1	58	20.6	58.3
10	21.2	58.2	20.4	58.4	18.7	58.7
11 (Finish)	19.9	58.3	19.8	58.9	20.3	58.9
avg	20.1	58.2	19.9	58.3	19.8	58.8
sd	0.6	0.4	0.7	0.5	0.6	0.4

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะการทดลองซึ่งได้อธิบายลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์อย่างละเอียดดังนี้

ก) อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ

- เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุนยี่ห้อ BUHLER รุ่น ECOMET5 ใช้สำหรับขัดชิ้นงานแผ่นวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ให้มีความหยาบผิวใกล้เคียงกัน โดยใช้กระดาษทรายเป็นตัวขัดผิวซึ่งเครื่องขัดยังมีระบบการไหลเวียนของน้ำเพื่อกำจัดเศษโลหะที่หลุดออกในระหว่างการขัดจึงทำให้ชิ้นงานตัวอย่างมีความสะอาด แสดงลักษณะของเครื่องขัด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน

- เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงรุ่น WYKO NT1100 ยี่ห้อ VEEGO INSTRUMENT INC. ใช้ในการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานแผ่นวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ก่อนทำการเคลือบผิวซึ่งเป็นเครื่องที่ทันสมัยสามารถคำนวณค่าความหนาของฟิล์มบางในระดับไมโครเมตร ถึงระดับนาโนเมตร ผลที่ได้จะแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานและภาพลักษณะ 3 มิติ เหมาะต่อการนำมาใช้ในวิเคราะห์ความหยาบผิวของการวิจัยครั้งนี้ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหยาบพื้นผิวแบบใช้แสง

- เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกรุ่น CREST 6659 เป็นเครื่องที่สามารถปรับค่าความถี่ได้หลายช่วง ซึ่งจะใช้ร่วมกับสารละลายโดยในการวิจัยครั้งนี้สารละลายที่ใช้ร่วมกับเครื่องอุลตราโซนิค คือ สารละลายสารละลายอะซิโตน นอกจากนี้ตัวเครื่องมีการติดตั้งตัวให้ความร้อนเพื่อกำจัดสารมลทินที่เกาะอยู่บนชิ้นงานด้วย โดยอุณหภูมิที่ใช้คือ 30 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องอัลตราโซนิก

- กระจายทรายเบอร์ 180, 200, 320, 400, 600 แสดงดังรูป 3.8



รูปที่ 3.7 กระจายทรายที่ใช้ในการวิจัย

- ข) อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานสำหรับการใช้การปฏิบัติทดสอบใช้งาน

จริง

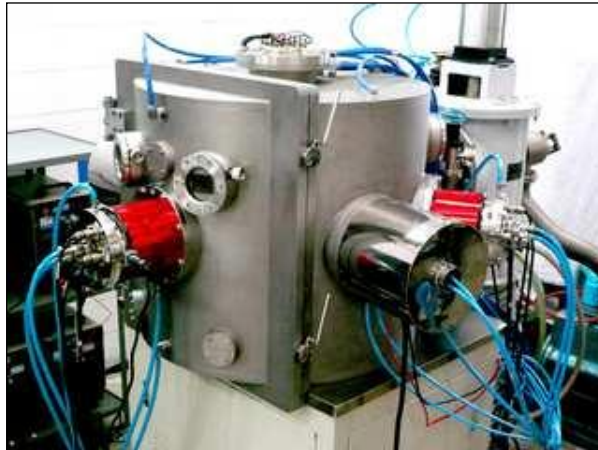
- เตาอบชิ้นงานแบบดั้งเดิม รุ่น CARBOLITE TYPE CWF 12/13 ใช้ในการอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 สำหรับใช้เป็นวัสดุถูกกัดผิวในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง ซึ่งเตาอบแบบดั้งเดิมสามารถให้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1400 องศาเซลเซียสภายในเตาบรรจุด้วยอิฐทนไฟที่ทำจากอะลูมินาออกไซด์ซึ่งสามารถต้านทานอุณหภูมิได้สูงและป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปสู่บรรยากาศภายนอกเหมาะต่อการนำไปใช้ในการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เตาอบชิ้นงานแบบดั้งเดิม

ก) อุปกรณ์สำหรับการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์

- เครื่องเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีแบบ Cathodic arc deposition สำหรับเครื่องนี้ตั้งอยู่ที่บริษัท นาโนซิลล์ จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยบริษัทเป็นผู้เคลือบให้



รูปที่ 3.9 เครื่องเคลื่อนผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์

ง) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสึกหรอ

- ในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงได้เลือกใช้เครื่อง Computer Numerical Control หรือเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยเครื่องกัดที่ใช้ในการทำปฏิบัติการครั้งนี้เป็นเครื่อง แบบ 3 แกน โดยมีการอ้างอิงระบบแกนในแบบ คาร์ทีเซียน 3 มิติ โดยเครื่องกัดซีเอ็นซีทั่วไปจะออกแบบให้โต๊ะงานเคลื่อนที่ในแกน X และ Y ส่วนแกน Z จะเป็นส่วนของ Spindle ที่เป็นส่วนเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องกัดซีเอ็นซียี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16

- ในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการได้เลือกใช้เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดและเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลื่อนผิวในการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการสึกหรอและวัดค่าความแข็งของชิ้น

เคลื่อนไอรยะเหยทางฟลลลล โดยเครอื่งน้ด้ตั้งอยู่ท้บรลยท้ CSM instrument ท้ประเทศ สवलเซอร์แลนด้ แสดงด้งรูปท้ 3.11 และ 3.12 โดยการทดสอบบรลยท้เป็นผู้ทดสอบให้



รูปท้ 3.11 เครอื่งวัดค่าความแ้็งระดับ
นาโน (Nanoindenter)



รูปท้ 3.12 เครอื่งทดสอบความด้านทานต่อกรขูดจลด
(Scratch tester)

จ) อุปกรณ์ส้หรับการทดสอบการเกลดออกซลเดชั่น

- เตอบแบบท้อนอน (Tube furnace)รุ่น GHA 12/600/3216P1เพื่อให้ความร้อแ้งจ้งงาน โดยการใช้บรรยากลทภายในเตापดลไม่ม่การล้แ้สเพื่อจ้ลองให้เหมาะสมก้บสภาพการจ้งานจ้ริงซ้งเตอบแบบนอนสามารถให้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1200 องศาเซลเซียสตัวท้อเตาทำด้วยอฐทนไฟท้ทำจากอะลูมินาออกซลเดซึ่งสามารถด้านทานอุณหภูมิได้สูงเหมาะสมต่อกรนำป้ไปใช้ในการว้จยแสดงด้งรูปท้ 3.13



รูปที่ 3.13 เตาอบแบบท่อออน (Tube furnace)

จ) อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ส่วนผสมทางเคมี และวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน

- เครื่องทดสอบหาความหนาของชั้นเคลือบ Calotest ของ CSM instrument สำหรับวัดค่าเพื่อคำนวณความหนา เป็นเครื่องที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเคลือบผิวเพื่อวัดหาความหนาอย่างง่าย โดยเครื่องนี้ตั้งอยู่ที่บริษัท CSM instrument ที่ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่อง Calotest

- กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope, SM) รุ่น HZ 4D ยี่ห้อ LEICA ใช้ในการศึกษาลักษณะการสึกหรอและวัดค่าการสึกหรอของชิ้นงานดอกกัดที่ผ่านการทดสอบในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 350 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงรุ่น ZEISS AX10 พร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ(image analysis) ใช้ในการตรวจโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนและหลังการอบชุบ แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) รุ่น JSM-5410 ยี่ห้อ JEOL ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและรอยการสึกหรอของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์- โคบอลต์เกรด K10 ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงโดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า และมีการใช้ EDS ร่วมในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี เครื่องนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ความเสียหายและการกัดกร่อนของวัสดุ ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติปทุมธานี ฯลฯ แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

- X-ray Diffraction รุ่น D8 ยี่ห้อ Bruker ใช้ในการวิเคราะห์ชั้นเคลือบโลหะทางฟิสิกส์ก่อนและหลังการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน แสดงดังรูป 3.18



รูปที่ 3.18 เครื่อง X-ray Diffraction

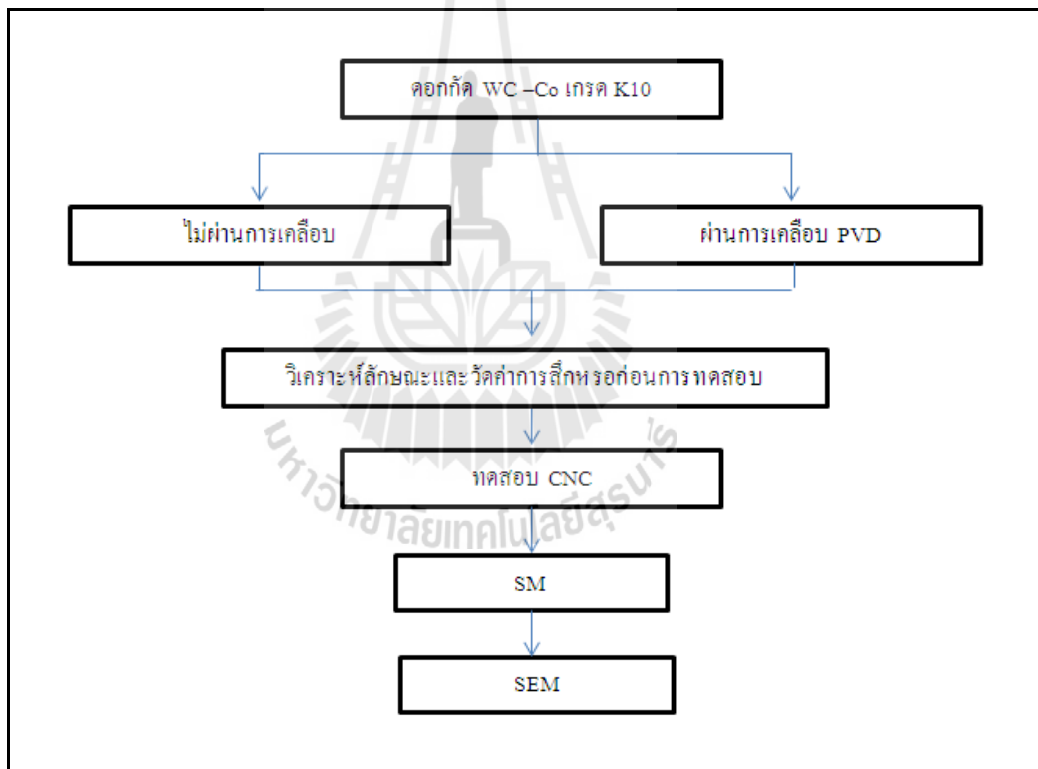
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- สำหรับเอทานอลสารเคมีเหล่านี้ใช้เพื่อเตรียมกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกคราบไขมันให้หลุดออกจากชิ้นงาน
- กรดไนตริก(HNO_3) ใช้สำหรับกัดชิ้นรอยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนและหลังอบชุบทางความร้อน
- เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) ใช้สำหรับกัดชิ้นรอยโครงสร้างจุลภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เกรด K10ก่อนทำการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์

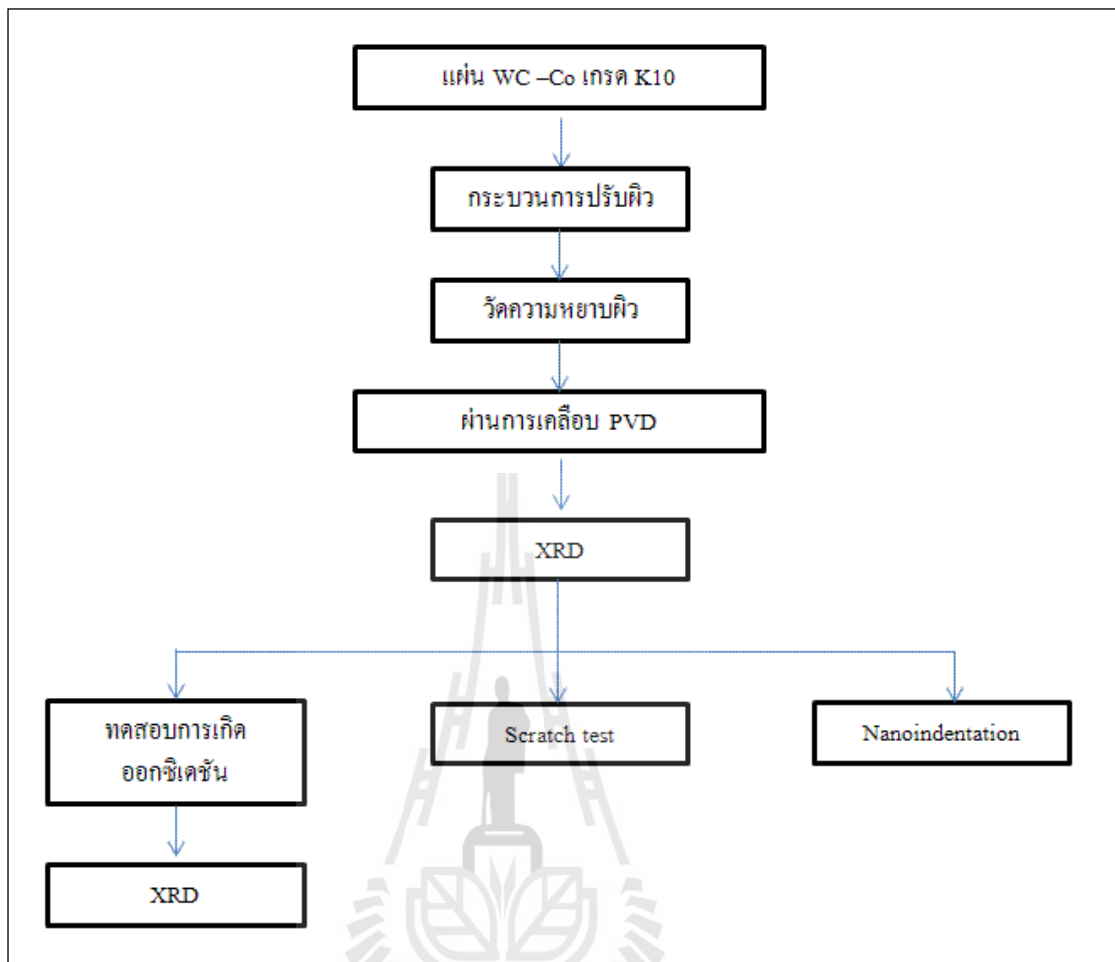
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัยครั้งนี้มีหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การเตรียมชิ้นงาน การทดสอบหาความหนาชั้นเคลือบ แล้วนำไปทำการทดสอบในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง และการปฏิบัติทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ และทดสอบการเกิดออกซิเดชัน หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ทดสอบในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงไปวิเคราะห์และวัดค่าการสึกหรอของคมตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังจากทดสอบการ

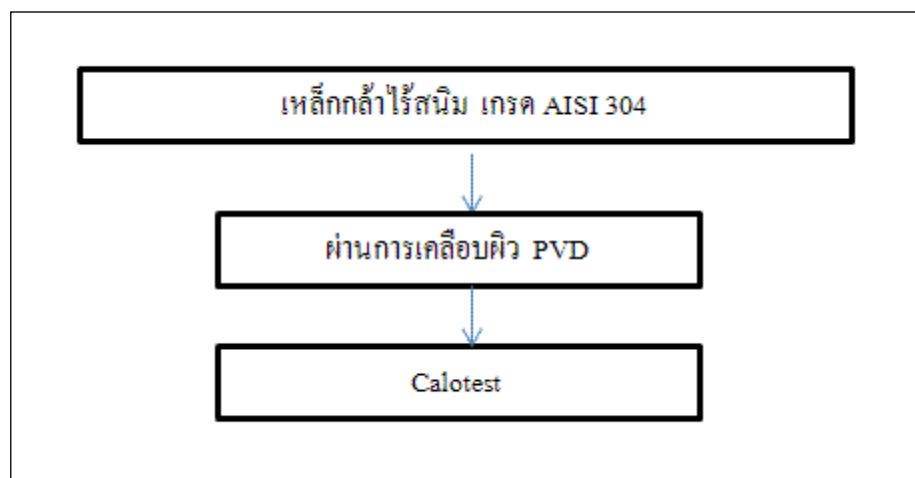
ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิค EDS และวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันบนชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค XRD เพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแผนภาพการทำวิจัยทั้งหมด ดังรูปที่ 3.19, 3.20 และ 3.21 ซึ่งมีการอธิบายอย่างละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 การดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง



รูปที่ 3.20 การดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.21 การหาความหนาชั้นเคลือบ

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ

3.2.1.1 ดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ดอกกัดชนิด หัวแบน 2 ฟัน (2-flute flat-end mill) มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) ประมาณ 8 มิลลิเมตร ความยาวของใบมีด (L_1) ประมาณ 25 มิลลิเมตรและความยาวของดอกกัดทั้งหมด (L_2) 80 มิลลิเมตร ล้างทำความสะอาดผิวดอกกัดด้วยเอทานอลก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ ทำการวิเคราะห์และวัดค่าการสึกหรอเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope, SM) ที่กำลังขยาย 350 เท่า

3.2.1.2 แผ่นทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 ขนาด 20 มิลลิเมตรและเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 304 ทำการขัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน แล้วจึงล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล จากนั้นจึงทำการวัดค่าความหยาบเฉลี่ยโดยใช้เครื่อง profile-meter แบบใช้แสง ได้ค่าความหยาบเฉลี่ยผิวดังตารางที่ 3.1

3.2.1.3 นำชิ้นงานข้อ 3.2.1.1 และ 3.2.1.2 หลังจากเสร็จสิ้นการล้างทำความสะอาดผิวและทำการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนเคลือบแล้ว ให้นำชิ้นงานไปเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์ ประเภท Cathodic arc deposition โดยมีชั้นเคลือบดังนี้ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) โดยบริษัท นาโนชีลด์ จำกัดเป็นผู้เคลือบให้

3.2.1.4 เตรียมวัสดุสำหรับถูกกัดผิวเพื่อใช้ทดสอบการสึกหรอในสภาวะการใช้งานจริงคือ เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 โดยทำการอบชุบด้วยอบแบบดั้งเดิมโดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1050 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที แล้วจึงนำออกมาเย็นตัวในอากาศ จากนั้นเมื่อชิ้นงานเย็นตัว จึงทำการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาทีทำการอบคืนไฟ 2 รอบ จากนั้นนำชิ้นงานไปตัดทดสอบความแข็งโดยทำการวัดตามรูปที่ 3.3 โดยค่าความแข็งหลังอบชุบที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 3.3 พบว่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ภายหลังชุบแข็ง มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในระดับมาตรฐาน คือ อยู่ระหว่าง 58-62HRC และค่อนข้างมีความแข็งสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งมีโครงสร้างหลังอบชุบแสดงดังรูปที่ 3.4x. หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการปลอกผิวที่เกิดการสูญเสียคาร์บอนและเกิดสเกลออกด้วยเครื่อง CNC โดยใช้หัวกัดแบบปลอกผิว ใช้รอบการหมุน 800 รอบต่อนาที โดยการป้อนชิ้นงานเข้าสู่มีดกัดใช้การควบคุมแบบมือ (Manual)

3.2.2 การหาค่าความหนาของชั้นเคลือบ

ในส่วนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์จะนำไปทำการหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง Calotest จะใช้หัวบอลทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรหมุนกดลงบนผิวชั้นเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ซึ่งตำแหน่งของรอยกดทรงกลมจะสัมพันธ์ต่อชั้นงานและแรงกดที่มีค่าคงที่โดยจะกดลงไปให้เกิดรอยหลุมไม่เกินครึ่งลูกบอลทรงกลม ในระหว่างที่ลูกบอลหมุนต้องคอยหยุดสารละลาย (น้ำผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์) ต่อเนื่อง แล้วจึงทำการวัดด้วยเลนส์สเกลสายตา โดยทำการวัดและคำนวณดังรูปที่ 2.3 และค่าความหนาของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิดที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 3.4



ตารางที่ 3.4 ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN (ถูกทดสอบให้โดย บริษัท นาโนซีลส์ จำกัด)

ชั้นเคลือบ	ลักษณะชั้นเคลือบ	ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นเคลือบ (μm)
TiN		2.18
AlCrN		5.19
TiAlSiN		2.54
AlCrTiSiN		2.27

3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง

3.2.3.1 นำดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์โดยมีชั้นเคลือบ ดังนี้ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) อะลูมิเนียมโครเมียม ไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และ ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) ไปวิเคราะห์และวัดค่าการสึกหรอก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอ

3.2.3.2 ศึกษาพฤติกรรมของการสึกหรอของดอกกัดด้วยเครื่อง CNC โดยกำหนดตัวแปรของกระบวนการกัด ในสภาวะการใช้งานจริงที่ต้องจดบันทึก และกำหนดให้คงที่ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบและประมวลผล คือ

- รอบการหมุน (Spindlerevolution) 7000 รอบต่อนาที.
- อัตราการป้อน (Feed rate) 140 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความเร็วในการตัด (Cutting speed) 2.9 เมตรต่อวินาที
- รัศมีความลึกของการตัด (Radialdepthofcut) 0.02 มิลลิเมตร
- ความลึกในการตัด (Depthofcut) 2 มิลลิเมตร
- ความยาวในการตัด (Cuttinglength) ในแต่ละครั้งที่ทำการวัดประมาณ 500 มิลลิเมตร
- ชนิดของสารหล่อเย็น คือ น้ำมัน

ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการวัดค่าการสึกหรอทุกครั้งจากระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบรอบละ 500 มิลลิเมตร โดยวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flankwear) จากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนแปลง โดยวิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3685 แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยที่อายุการใช้งาน (Tool life criterion) ของดอกกัดตามมาตรฐาน ISO 3002/1 อยู่ที่ไม่เกิน $V_{Bmax} \leq 200 \mu m$ (Juan, H. et al., 2003; HEO, J. Y. et al., 2011)

3.2.3.3 แต่ละรอบของการกัดผิว จะตรวจสอบพื้นผิวของบริเวณคมตัดและวัดค่าการสึกหรอภายหลังการทดสอบเสมอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope, SM) ที่กำลังขยาย 350 เท่า จนกระทั่งดอกกัดเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป

3.2.3.4 เปรียบเทียบชนิดของชั้นเคลือบที่มีต่อพฤติกรรมของการสึกหรอของดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์

3.2.4 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.4.1 นำแผ่นคาร์ไบด์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ไปทำการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยเครื่อง XRD รุ่น D8 ยี่ห้อ Bruker ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของพลังงาน (intensity) และมุมการเลี้ยวเบน (2θ) ของธาตุหรือสารประกอบจะมีมุมการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน การวิจัยครั้งนี้ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานจาก $\text{Cu K}\alpha$

3.2.4.2 นำแผ่นคาร์ไบด์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์ มาทดสอบ Scratch Test เพื่อวิเคราะห์หาชั้นเคลือบแต่ละชนิดสามารถเกิดการหลุดล่อนที่แรงกระทำวิกฤติได้ โดยกำหนดให้แรงกระทำเริ่มที่ 0.9 นิวตันจนถึงแรงกระทำสุดท้ายที่ 150 นิวตัน ความเร็วของหัวกด 4 มิลลิเมตรต่ออนาที และความยาวในการลากหัวกด 2 มิลลิเมตร และทำการทดสอบ Nano indentation test โดยใช้หัวกดวัดความแข็งแบบ Berkovich (โดยการทดสอบ Scratch Test และ Nano indentation test บริษัท CSM instrument เป็นผู้ทำการทดสอบให้)

3.2.4.3 แผ่นคาร์ไบด์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์จะถูกทดสอบการเกิดออกซิเดชันด้วยเตาอบแบบท่อนอน ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบปกติ

3.2.5 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด

ภายหลังการทดสอบการสึกหรอในระดับปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง จะนำชิ้นงานที่เกินช่วงอายุการใช้งานมาตัดเอาบริเวณหัวกัดไปวิเคราะห์รอยการสึกหรอของคมตัด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่าเพื่อให้มองเห็นภาพได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบ EDS เพื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสึกหรอหลังจากทำการกัดผิว

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ

การทดสอบการสึกหรอในระดับห้องปฏิบัติการของวัสดุกรณีที่ถูกลบผิวเป็นการศึกษาเพื่อทำนายความต้านทานต่อการสึกหรอซึ่งสามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติหลายอย่างร่วมกัน เช่น ความสามารถในการยึดเกาะ ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ออกไซด์ที่เกิดขึ้น เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทดสอบด้วยการวัดค่าความแข็งระดับนาโน ความต้านทานต่อการขูดขีดและการเกิดออกซิเดชัน

4.1.1 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลจากการวัดค่าความแข็งระดับนาโนของชั้นเคลือบไอระเหยทางฟิสิกส์ คือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrN มีค่าความแข็งน้อยที่สุดประมาณ 32 GPa และชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่าความแข็งสูงที่สุดประมาณ 45 GPa ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากก่อนการเติมธาตุซิลิกอน ชั้นเคลือบ AlCrTiN มีค่าความแข็งสูงกว่าชั้นเคลือบ TiAlN (M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim., 2008; Tomas, P., Albano C., 2011) และจากผลการทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นเคลือบ TiAlSiN และ AlCrTiSiN ด้วย SEM (ไม่สามารถเปิดเผยรูปภาพได้ เนื่องจากเป็นความลับของบริษัท) จากภาพโครงสร้างสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเติมธาตุซิลิกอนเข้าไปจะมีผลทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากธาตุซิลิกอนจะถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้น amorphous ในรูปของซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยผลึกของ AlCrTiN และ TiAlN ในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เกรนจึงละเอียดขึ้นส่งผลให้มีขอบเกรนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงถูกยับยั้ง ซึ่งภาพโครงสร้างสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Stan, V., Maritz, G.J. V.-H., Pavla, K., Jan, P., 2005; M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim., 2008; Yu, D., Wang, C., Cheng, X., Zhang, F., 2009; Chang, C.L., Lee, J.W., Tseng, M.D., 2009; Wang, S.Q., Chen, K.H., Chen, L., Zhu, C.J., Li, P. and Du, Y., 2011; Panich, N., Surinphong, S., Karpov, D.A., Tan, Y. K., Goh, C. F., Ma, J., 2012) ดังนั้นค่าความแข็งของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ TiAlSiN จึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN (ถูกทดสอบให้โดยบริษัท CSM instrument)

	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN
ค่าความแข็ง (GPa)	35	32	41	45

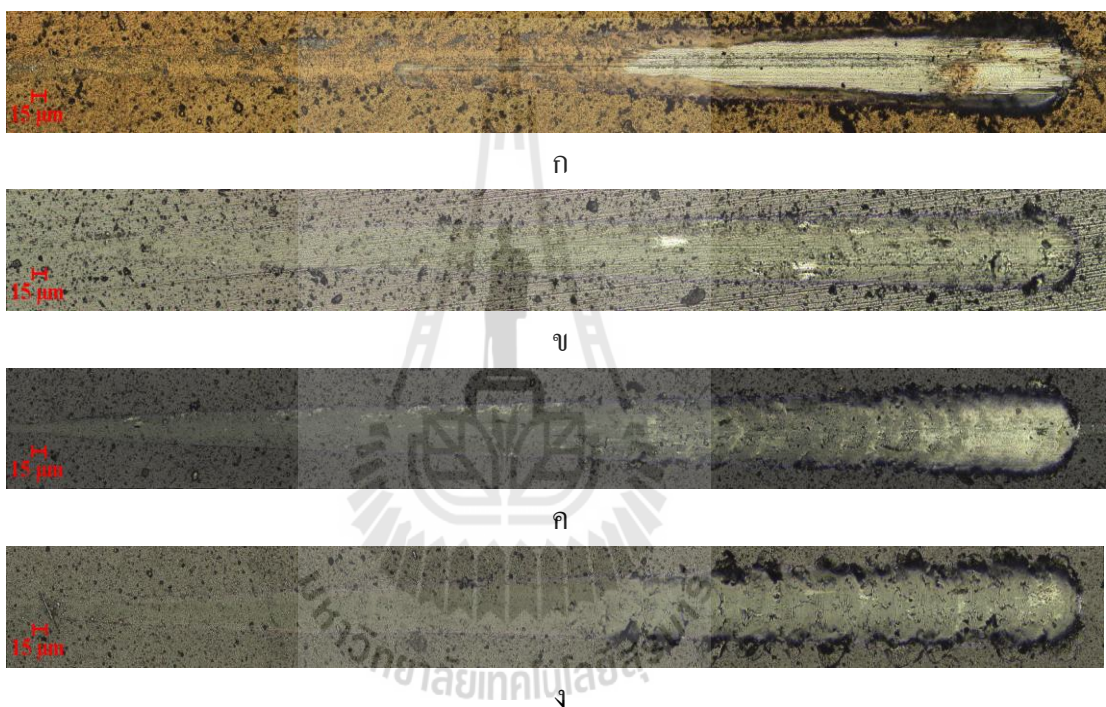
4.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด

จากรูปที่ 4.1 รอยขูดขีดของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด (ถูกทดสอบให้โดยบริษัท CSM instrument) ด้วยการให้แรงกระทำโดยเริ่มต้นที่ 0.9 นิวตัน เพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้าย 150 นิวตัน ซึ่งวัดค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (First delamination, Lc1) และค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกสมบูรณ์ (Full delamination, Lc2) โดยเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบผลรอยขูดขีดของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิด พบว่า ชั้นเคลือบ TiN จะเกิดการหลุดลอกสมบูรณ์เร็วกว่าชั้นเคลือบ AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN อย่างชัดเจนเนื่องจากมีค่า Lc2 ต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 84.2 นิวตัน ส่วนชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่า Lc1 สูงที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้ประมาณ 113.3 นิวตัน โดยที่ชั้นเคลือบ AlCrN มีค่า Lc1 ประมาณ 90.4 นิวตัน ดังจะเห็นว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN เมื่อถูกหัวกดลากไปจนถึง 150 นิวตัน ยังไม่สามารถตรวจวัดค่า Lc2 ได้ แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN มีค่า Lc2 เกินช่วง 150 นิวตัน เนื่องจากการกำหนดใช้แรงกระทำสุดท้ายสามารถเพิ่มได้ถึง 200 นิวตัน แต่ในความเป็นจริงถูกจำกัดให้ใช้เพียง 150 นิวตัน เพื่อให้หัวกดมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

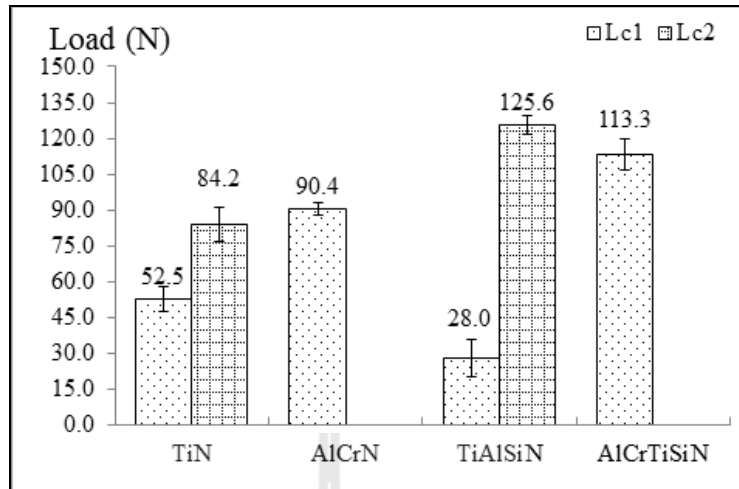
อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.3 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิด ที่วัดได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ AlCrN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้และมีแนวโน้มคงที่แม้จะเพิ่มแรงกระทำจนถึง 150 นิวตันก็ตาม

ค่าความแข็งที่สูงสามารถบอกถึงความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีเยี่ยม (Leyland, A., Matthews A., 2000) ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะกับวัสดุพื้นดีที่สุดถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ความหนาของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN (2.27 ไมครอน) จะมีค่าน้อยกว่าความหนาของชั้นเคลือบ AlCrN (5.19 ไมครอน) ก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่สูงที่สุดที่วัดได้ดังในตารางที่ 4.1 แต่ในกรณีของชั้นเคลือบ AlCrN ที่มีความสามารถในการต้านทานต่อการขูดขีดได้ดีรองจากชั้นเคลือบ AlCrTiSiN เป็นผลจากชั้นเคลือบ AlCrN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการ

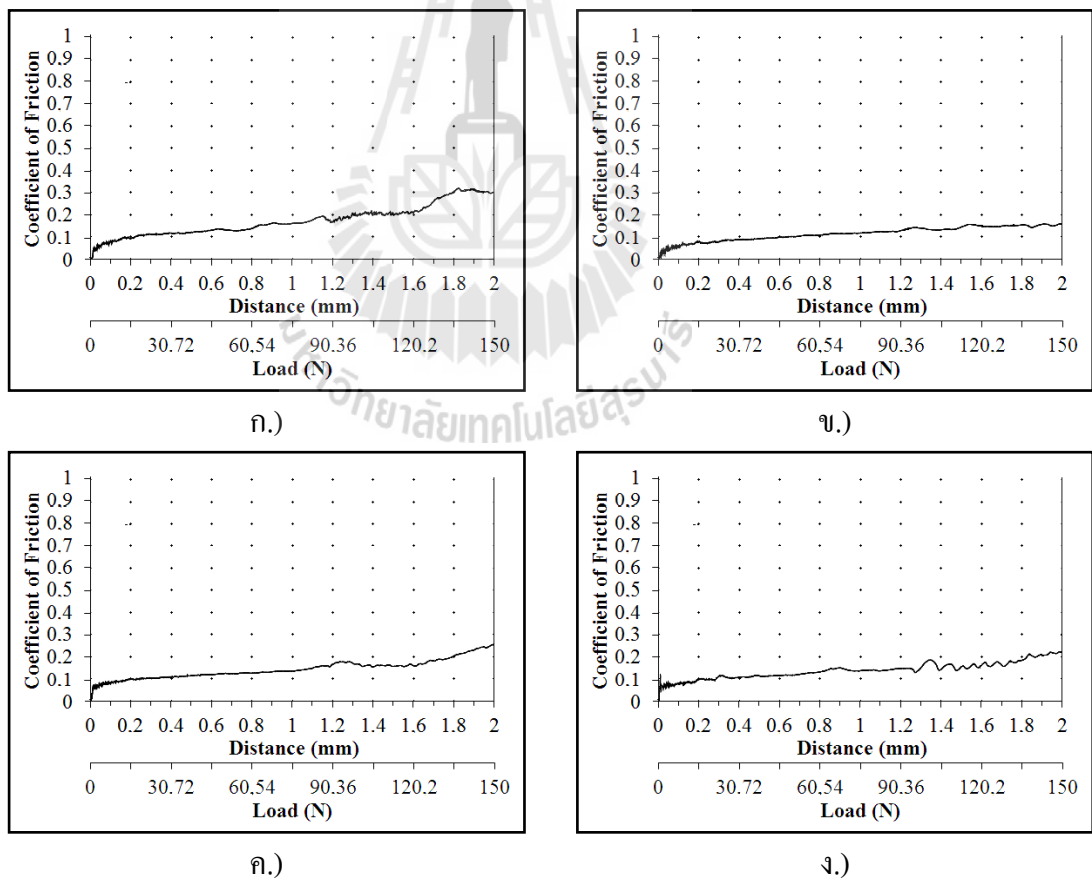
ทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดจะเห็นว่าชั้นเคลือบ TiAlSiN ที่มีค่าความแข็งถึง 41 GPa จะเกิดการหลุดล่อนรุนแรงกว่าชั้นเคลือบ AlCrN ที่มีค่าความแข็ง 32 GPa ดังนั้นคุณสมบัติด้านค่าความแข็งเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถใช้ในการทำนายความต้านทานต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบได้ในงานวิจัยครั้งนี้ (Mo, J.L., Zhu, M.H., 2009)



รูปที่ 4.1 รอยหวัคจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN



รูปที่ 4.2 ค่า Lc1 และ Lc2 ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN



รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ

ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN

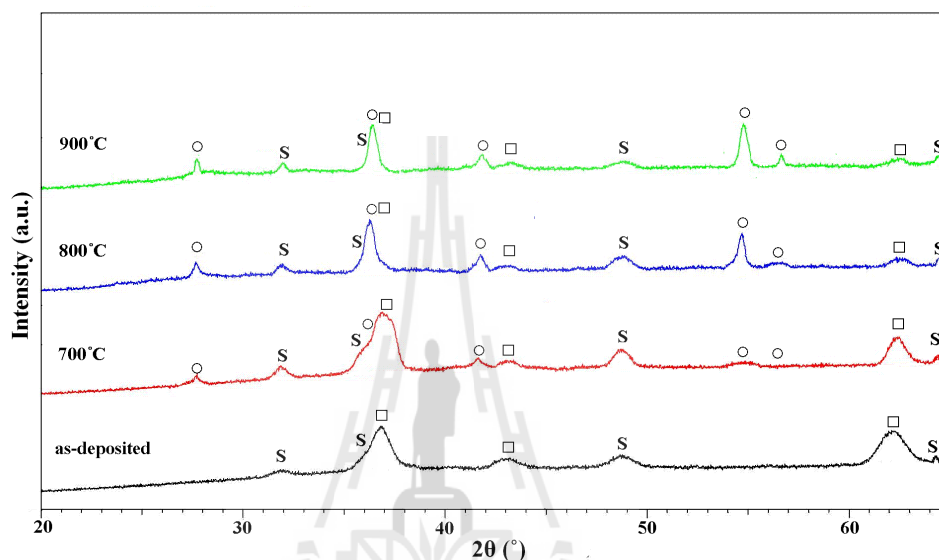
4.1.3 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เกรด K10 ที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบไอระเหยทางฟิสิกส์

การทดสอบการเกิดออกซิเดชันเป็นการจำลองสภาวะการใช้งานเสมือนจริงที่อุณหภูมิสูงและสัมผัสกับออกซิเจน จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 เป็นผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN หลังจากทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เมื่อพิจารณารูป 4.4 ชั้นเคลือบ TiN เริ่มมีฟลักของไทเทเนียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สำหรับรูป 4.5. ชั้นเคลือบ AlCrN เริ่มมีฟลักของโครเมียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สำหรับรูป 4.6 ชั้นเคลือบ TiAlSiN จะไม่ปรากฏฟลักของซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนถูกทำให้อยู่ในรูปของ amorphous ของซิลิกอนไนไตรด์ (M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim., 2008) ส่วนฟลักของออกไซด์นั้นจะเริ่มมีฟลักของไทเทเนียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สำหรับรูป 4.7 ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN จะไม่ปรากฏฟลักของซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนถูกทำให้อยู่ในรูปของ amorphous ของซิลิกอนไนไตรด์ ส่วนฟลักของออกไซด์นั้นจะเริ่มมีฟลักของไทเทเนียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

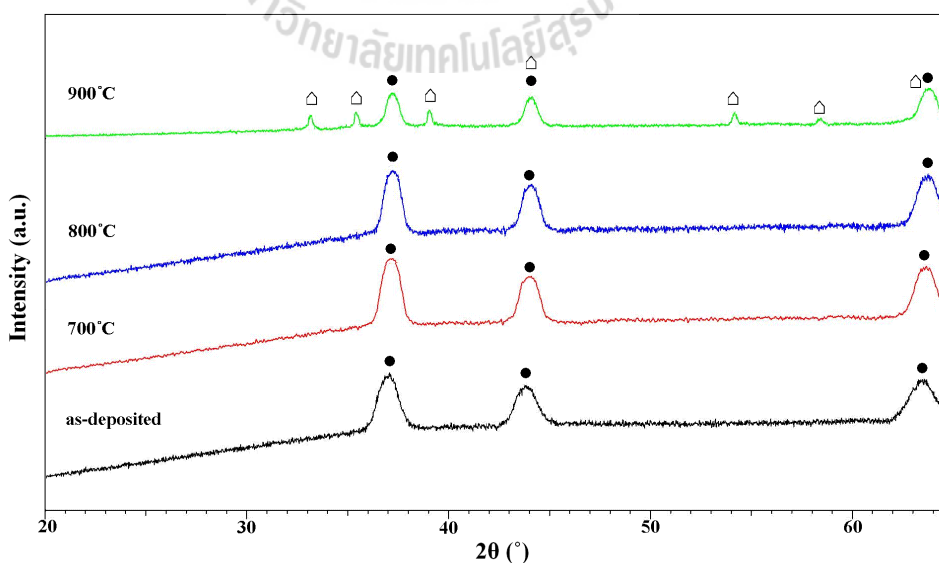
เมื่อเปรียบเทียบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 เห็นได้ว่าชั้นเคลือบ AlCrN และ AlCrTiSiN มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้สูงกว่าชั้นเคลือบ TiN และ TiAlSiN และเมื่อพิจารณาออกไซด์ กล่าวคือการปรากฏออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในรูปของแข็ง (Solid lubricant) มีคุณสมบัติช่วยต้านทานต่อการสึกหรอ (Endrino, J.L., Fox-Rabinovich, G.S., Gey, C., 2006; Mo, J.L., Zhu, M.H., Lei, B., Leng, Y.X., Huan, N., 2007; Liew, W.Y.H., Dayou, S., Ismail, M.A.B., Siambun, N.J., Dayou, J., 2012)

หมายเหตุ

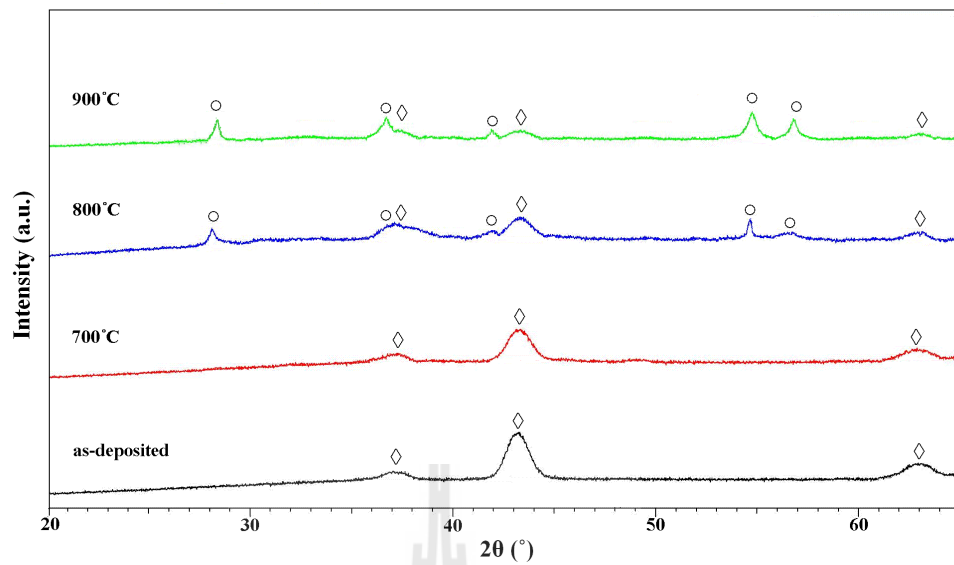
สัญลักษณ์ ●	คือ	พีคของ AlCrN	สัญลักษณ์ □	คือ	พีคของ TiN
สัญลักษณ์ ◇	คือ	พีคของ TiAlN	สัญลักษณ์ △	คือ	พีคของ AlCrTiN
สัญลักษณ์ ○	คือ	พีคของ TiO ₂	สัญลักษณ์ ⊠	คือ	พีคของ Cr ₂ O ₃
สัญลักษณ์ S	คือ	พีคของวัสดุพื้น			



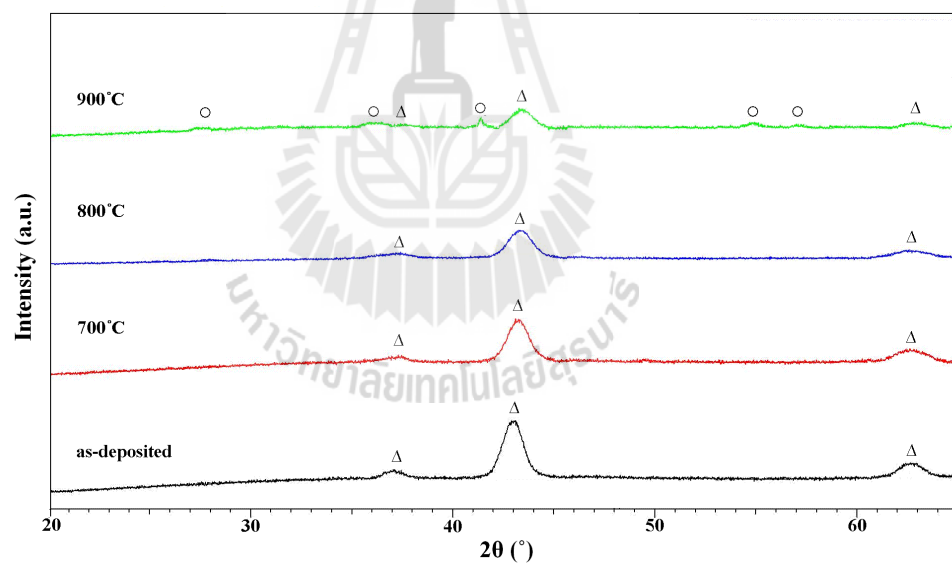
รูปที่ 4.4 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.5 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.6 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiAlSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.7 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ

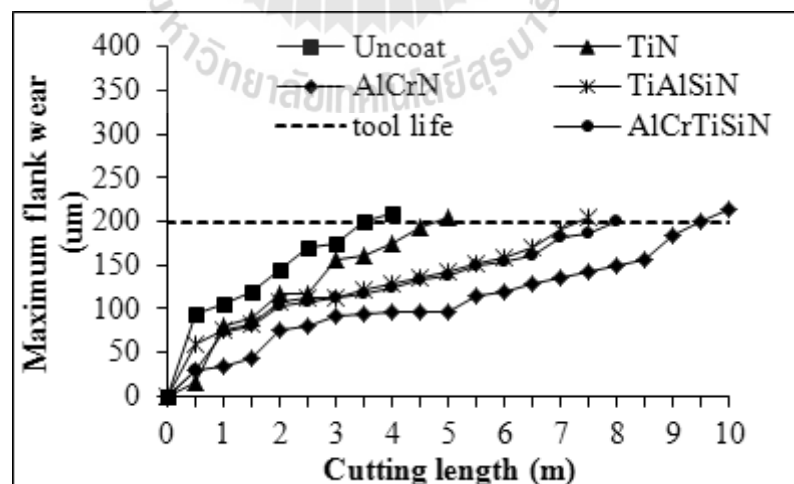
4.2 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง

ในการทดสอบการสึกหรอในระดับห้องปฏิบัติการเป็นแนวทางหนึ่งในการศึกษาถึงความต้านทานต่อการสึกหรอและผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับความสอดคล้องกับผลการทดสอบใช้งานจริงเพียงใด

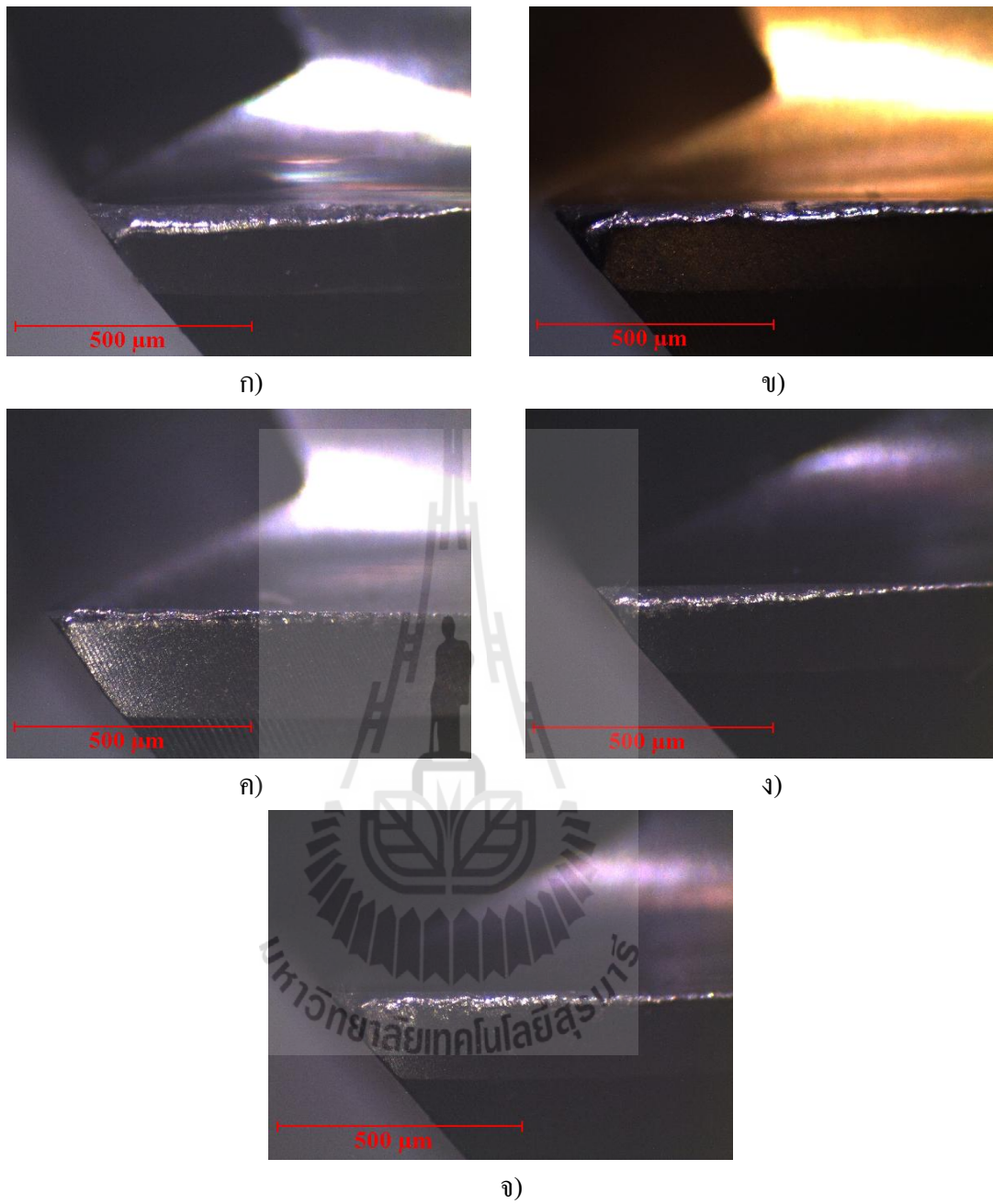
4.2.1 ผลการทดสอบการกัดผิว

จากรูปที่ 4.8 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ของดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบโดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็นพบว่า ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีอายุการใช้งานสูงสุดประมาณ 9.5 เมตรซึ่งสูงกว่าดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN, TiN และที่ไม่ผ่านการเคลือบซึ่งมีอายุการใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 8, 7.5, 5 และ 3.5 เมตร ตามลำดับ (โดยการทดสอบมีการทดสอบซ้ำ 1 รอบ ซึ่งมีผลแนวโน้มใกล้เคียงกันสามารถดูได้จากภาคผนวก จ)

เนื่องจากดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่า AlCrTiSiN, TiAlSiN และ TiN ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 4.3ก.ถึง 4.3ข. และเมื่อเปรียบเทียบรอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และที่ไม่ผ่านการเคลือบ ที่ความยาวการตัด 4 เมตรแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า คมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีค่าการสึกหรอ 95.81 ไมครอน แต่คมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN, TiN และที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าการสึกหรอ 124.46, 128.9, 177.12 และ 209.79 ไมครอน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเยี่ยม (รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัดทั้งหมดสามารถดูได้จากภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.8 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบโดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น



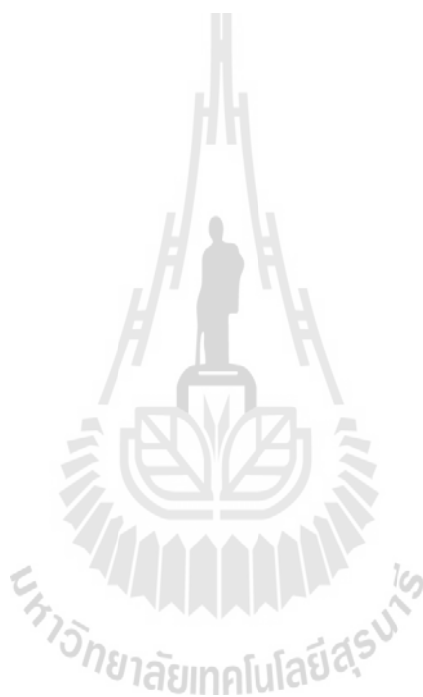
รูปที่ 4.9 รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัด ก) ไม่เคลือบ ข) TiN ค) AlCrN ง) TiAlSiN และ
 จ) AlCrTiSiN หลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4 เมตร

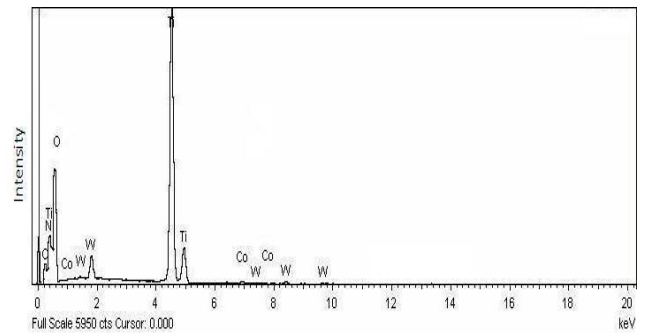
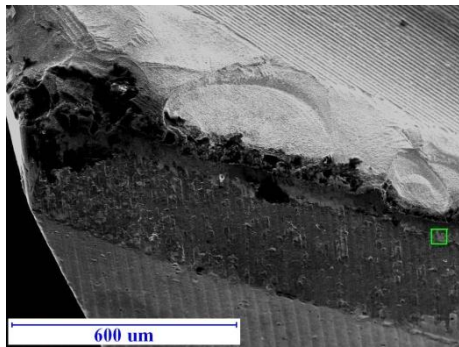
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัด

เพื่อยืนยันผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการในหัวข้อ 4.1.3 จึงต้องทำการวิเคราะห์รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วยชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN หลังทดสอบกัดผิวจนเกินช่วงอายุการใช้งาน (Tool life) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยใช้เทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวพิจารณาจากรูป 4.10ก บริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย TiN แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบในแต่ละธาตุที่มีความสำคัญ เช่น ธาตุไทเทเนียม (Ti) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) ทั้งสแตน (W) และ โคบอลต์ (Co) สำหรับรูป 4.10ข บริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย AlCrN แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบในแต่ละธาตุที่มีความสำคัญ เช่น ธาตุอะลูมิเนียม (Al) โครเมียม (Cr) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) และทั้งสแตน (W) สำหรับรูป 4.10ค บริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย TiAlSiN แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบในแต่ละธาตุที่มีความสำคัญ เช่น ธาตุไทเทเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) และทั้งสแตน (W) สำหรับรูป 4.10ง บริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย AlCrTiSiN แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบในแต่ละธาตุที่มีความสำคัญ เช่น ธาตุอะลูมิเนียม (Al) โครเมียม (Cr) ไทเทเนียม (Ti) ซิลิกอน (Si) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) ทั้งสแตน (W) และเหล็ก (Fe)

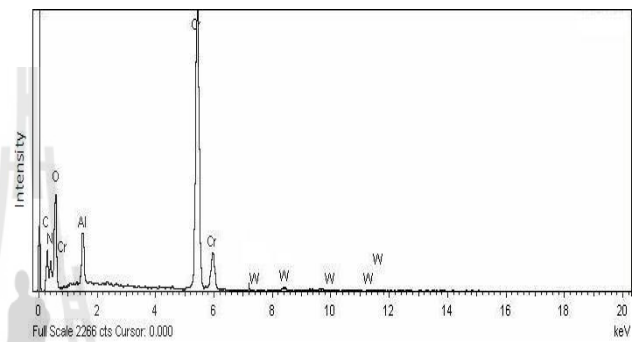
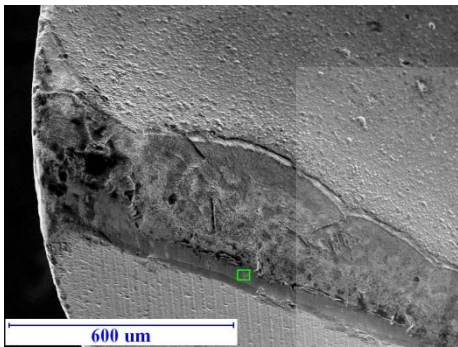
จากการวิเคราะห์รูป 4.10ก. ถึง 4.10ง. พบธาตุ O ปรากฏขึ้นบริเวณรอยการสึกหรอ มีความเป็นไปได้ว่าในการทดสอบการกัดผิวมีโอกาสเกิดออกไซด์ขึ้น ซึ่งธาตุ O มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีกับหลายๆ ธาตุ เช่น Ti, Cr และ Al เป็นต้น (Martin, N., Rousselot, C. 1998) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการตัด (Cutting temperature) และความเร็วในการตัด (Cutting speed) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัดจะมีผลให้อุณหภูมิบริเวณอัตรภาคชั้น (Interface) ระหว่างคมตัดและชิ้นงานเพิ่มขึ้น ถึงแม้จะใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดก็ตามดังในรายงานวิจัยของ (Shane, Y. H., Yucheng, D. 2001) ซึ่งชั้นเคลือบเมื่อได้รับแรงกระทำเป็นเวลานานจะมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีออกซิเจนร่วมด้วย จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น (Hajek, J. et al., 2005; Endrino, J.L., Fox-Rabinovich, G.S., Gey, C., 2006; Mo, J.L., Zhu, M.H., Lei, B., Leng, Y.X., Huan, N., 2007) ดังนั้นจากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.1 และ 4.2.2 สามารถอธิบายได้ว่า ดอกกัดที่เคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN หลังใช้กัดผิวจะปรากฏ Ti ออกไซด์ กลับมีอายุการใช้งานสั้นกว่าดอกกัดที่เคลือบด้วย AlCrN หลังใช้กัดผิวจะปรากฏ Cr ออกไซด์ ถึงแม้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN สูงกว่าชั้นเคลือบ AlCrN ก็ตาม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าออกไซด์ของธาตุไทเทเนียม

(Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ที่เกิดขึ้นให้ผลที่แตกต่างกัน สำหรับออกไซด์ฟิล์มของ อะลูมิเนียมและโครเมียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการกระทบ ร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการเพิ่มการ สึกหรือและความเสียหาย (Mo, J.L., Zhu, M.H., 2009)

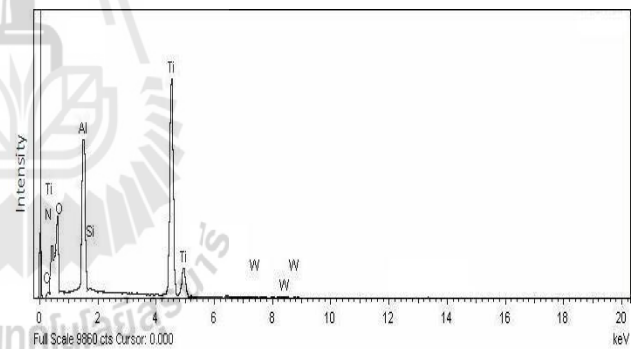
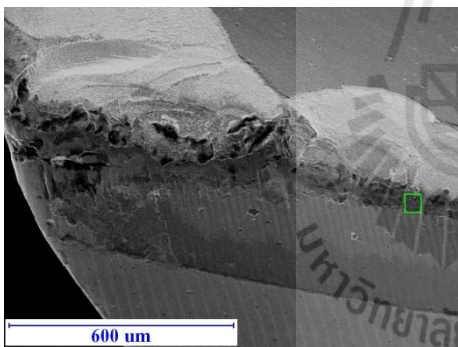




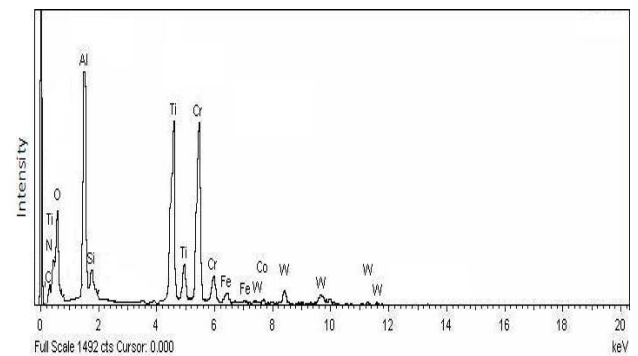
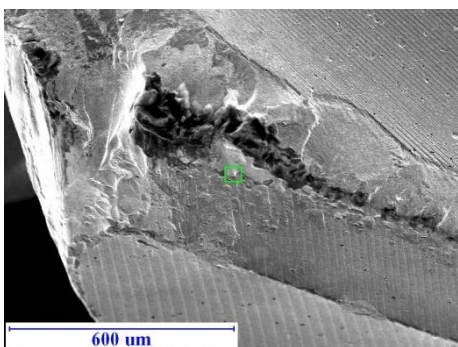
ก)



ข)



ค)

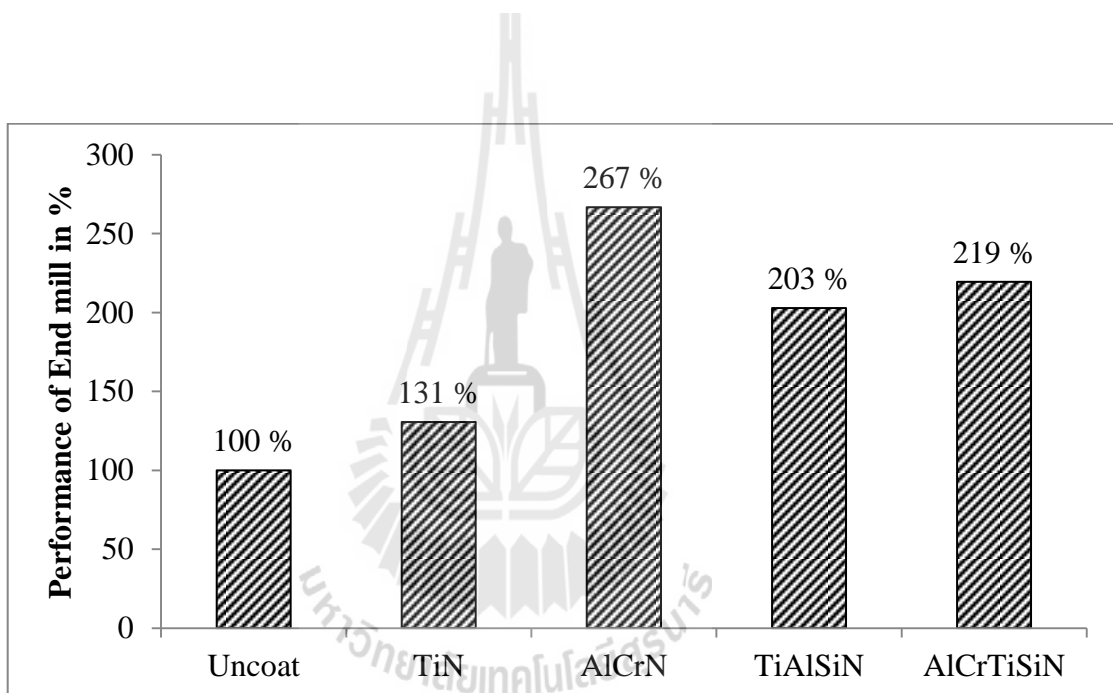


ง)

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN

4.2.3 ประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์

จากหัวข้อ 4.2.1 ผลการทดสอบกัดผิวของดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN ซึ่งดอกกัดแต่ละชั้นเคลือบมีอายุการใช้งาน (Tool life) แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำเสนอออกมาในรูปแบบของแผนภูมิแสดงประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวได้ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ดอกกัดที่ถูกเคลือบด้วย AlCrN, AlCrTiSiN, TiAlSiN และ TiN มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบถึง 167%, 119%, 103% และ 31% ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) หลังทดสอบกัดผิว

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะการทดลองต่อไป

5.1 สรุป

จากการทดสอบการสึกหรอในระดับทดสอบในห้องปฏิบัติการและ ระดับทดสอบปฏิบัติการใช้งานจริง และจากการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน ในงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปใจความสำคัญได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง สำหรับค่าความแข็งของชั้นเคลือบสามารถเรียงลำดับจากสูงสุดไปต่ำสุดได้ดังนี้ AlCrTiSiN , TiAlSiN , TiN และ AlCrN

5.1.2 จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นเคลือบสามารถเรียงลำดับจากสูงสุดไปต่ำสุดได้ดังนี้ AlCrTiSiN , AlCrN , TiN และ TiAlSiN

5.1.3 ค่าความแข็งเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้ในการทำนายความต้านทานต่อการสึกหรอได้

5.1.4 จากการทดสอบการเกิดออกซิเดชันชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าชั้นเคลือบ TiAlSiN และ TiN

5.1.5 จากการทดสอบในระดับปฏิบัติการใช้งานจริงโดยทดสอบกัดผิวเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 สามารถสรุปได้ว่าชั้นเคลือบ AlCrN มีอายุการใช้งานสูงกว่า AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN เนื่องจากชั้นเคลือบ AlCrN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN

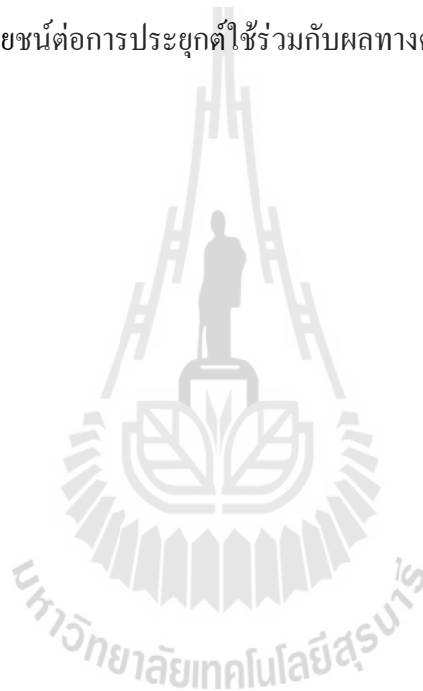
5.1.6 จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยสึกหรอของคมตัด พบว่าในกระบวนการกัดผิวจะปรากฏออกไซด์ขึ้นที่ผิวเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

5.2 ข้อเสนอแนะการทดลองต่อไป

ในการทดสอบการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบด้วย TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และไม่เคลือบ เป็นการศึกษาวิจัยเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งจะต้องทำวิจัยต่อไปเพื่อสามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะการทดลองดังนี้

5.2.1 ควรปรับตัวแปรในกระบวนการกัดผิวให้มีความแตกต่าง เช่น ความเร็วในการตัด ความเร็วรอบการหมุนของดอกกัด อัตราการป้อน และสารหล่อเย็น เป็นต้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการสึกหรออย่างชัดเจน

5.2.2 ควรมีการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อน เช่น การทดสอบด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท เพื่อประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ร่วมกับผลทางด้านการสึกหรอ



รายการอ้างอิง

Santhanam, A.T., Tierney, P. (1998). ASM Handbook Volume 16: Machining. **ASM International**. United States of America.

Bahadur, S. (1996). Effect of Surface Coatings and Treatments on Wear. **ASTM STP 1278**. USA., 6-7.

Craftsman CNC.(2013). [On-line].

Available: <http://www.craftsmancnc.co.nz/routerbits.html>

Batchelor, A. W., Lam, L. N., Chandrasekaran, M. (1999). Materials Degradation and its Control by Surface Engineering, **Imperial College Press**, Singapore: 187-206.

Mattox, D. M. (1998). Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. **Noyes Publications**. ISBN 0-8155-1422-0. USA.

CSM instrument.(2012). [On-line].

Available: http://www.csm-instruments.com/en/Coating_thickness

แผ่นอมรสิทธิ์. (2535). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. **ชวนพิมพ์**. กรุงเทพฯ.

Toya, T., Jotaki, R., Kato, A. (1986). Specimen Preparations in EPMA and SEM. **JEOL Training Center EP Section**.

ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์. (2547). การศึกษาหรือในงานอุตสาหกรรม. **สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)**. กรุงเทพฯ.

Wikipedia.(2012). [On-line].

Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanoindentation>

CSM instrument.(2012). [On-line].

Available: <http://www.csm-instruments.com/fr/Analysis-of-Mar-Scratch-Resistance-of-Automotive-Varnish-Clearcoats>

สุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์.(2008). เกร็ดความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของฟิล์ม PVD Hard Coatings. **Journal of Surface Engineering**. (1). KMUTT.

Wikipedia.(2012). [On-line].

Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanoindentation>

SPring-8.(2012). [On-line].

Available: http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/publications/scientific_results/soft_matter/topic9

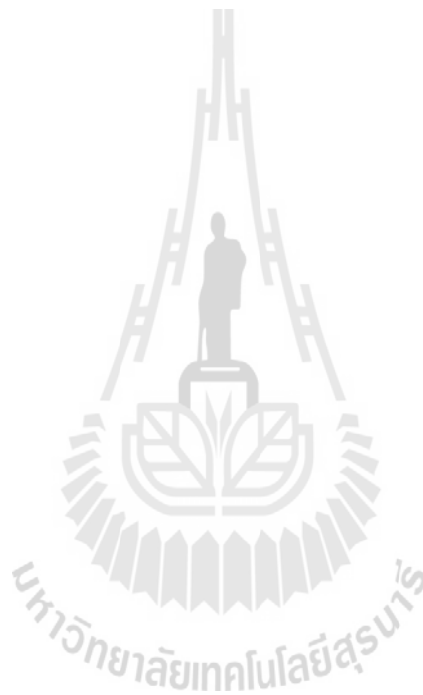
- Aykut, S., Bagci, E., Kentli, A., Yazıcıoğlu, O. (2007). Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapor deposition coated and uncoated tool. **Materials and Design**. (28): 1880-1888.
- Gaitan, G. B., Caicedo, J. C., Balogh, A. G., Gottschalk, S. (2007). Cutting tools performance enhancement by using a TiN/TiAlN multilayer coating system. **Physica Status Solidi (c)**. 4 (11): 4260-4266.
- Mummaw, C. (2008). Lowering Tooling Cost by Using Low-Friction Coatings. Mold making Technology Magazine. **Gardner Publications, Inc.** Ohio.
- Holmberg, K., Ronkainen, H., Matthews, A. (2000). Tribology of thin coatings. **Ceramics International**. (26): 787-795.
- Astakhov, V. P. (2011). Cutting Fluids (Coolants) and Their Application in Deep-Hole Machining. Theory and Practice of Deep-Hole Machining. **Book in preparation.**: 1-14.
- Stan, V., Maritza, G.J. V.-H., Pavla, K., Jan, P. (2005). Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. **Thin Solid Films**. (476): 1 – 29.
- Yu, D., Wang, C., Cheng, X., Zhang, F. (2009). Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. **Thin Solid Films**. (517): 4950–4955.
- Panich, N., Surinphong, S., Karpov, D.A., Tan, Y. K., Goh, C. F., Ma, J. (2012). Mechanical Properties of AlCrTiSiN Coatings Developed by Cathodic Arc for Protection Applications. **Solid State Phenomena**. (185): 81-83.
- Leyland, A., Matthews A. (2000). On the significance of the *H/E* ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behavior. **Wear**. (246): 1–11
- Mo, J.L., Zhu, M.H. (2009). Tribological oxidation behavior of PVD hard coatings. **Tribology International**. (42): 1758-1764.
- Tomas, P., Albano C. (2011). Structure and tribological properties of AlCrTiN coatings at elevated temperature. **Surface & Coatings Technology**. (205): S107–S110.

- Shane, Y. H., Yucheng, D. (2001). Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. (41): 1417–1437.
- Juan, H., Yu, S.F., Lee, B.Y. (2003). The optimal cutting-parameter selection of production cost in HSM for SKD61 tool steels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. (43): 679–686.
- Heo, J. Y., Cho, S.H., Je, T. J., Kim, K. H., Lee, H. W., Kang, M. C. (2011). Effects of honing treatment on AlP-TiN and TiAlN coated end-mill for high speed machining. **Nonferrous Met. Soc. China**. (21): s83-s87.
- Kang, M.C., Kim, K.H., Shin, S.H., Jang, S.H., Park, J.H., Kim, C. (2008). Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools. **Surface & Coatings Technology**. (202): 5621–5624.
- Chang, C.L., Lee, J.W., Tseng, M.D. (2009). Microstructure, corrosion and tribological behaviors of TiAlSiN coatings deposited by cathodic arc plasma deposition. **Thin Solid Films**. (517): 5231-5236.
- Martin, N., Rousselot, C. (1998). Use of theoretical model to investigate RF and DC reactive sputtering of titanium and chromium oxide coatings. **Surface and Coatings Technology**. (110):158-167.
- Hajek, J. et al. (2005). Tribological behaviour of hardwear resistant layers at hightemperatures. **Book in preparation.**: 2-18.
- Endrino, J.L., Fox-Rabinovich, G.S., Gey, C. (2006). Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. **Surface and Coatings Technology**. (200): 6840–6845.
- Mo, J.L., Zhu, M.H., Lei, B., Leng, Y.X., Huan, N. (2007). Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition. **Wear**.(263): 1423-1429.
- Liew, W.Y.H., Dayou, S., Ismail, M.A.B., Siambun, N.J., Dayou, J. (2012). Dry Sliding Behaviour of AlCrN and TiN Coatings. **Advanced Materials Research**. (576): 559-564.

Ululu Team.(2013). [On-line].

Available: <http://www.ululu.in/first-year/manufacturing-process/may-2009-3.html>

Wang, S.Q, Chen, K.H., Chen, L., Zhu, C.J., Li, P. and Du, Y. (2011). Effect of Al and Si additions on microstructure and mechanical properties of TiN coatings, **J. Cent. South Univ. Technol.** (18): 310–313



ภาคผนวก ก

การเขียนโค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC



การเขียนโค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC

เนื่องด้วยในการทดสอบในระดับปฏิบัติใช้งานจริง โดยทดสอบกัดผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ
 เย็นเกรด D2 จำเป็นต้องเขียนโค้ดโปรแกรมเพื่อให้ดอกกัดเคลื่อนที่ไปกัดผิวตามทิศทางที่ต้องการ
 ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้เขียนโค้ดไว้ดังนี้

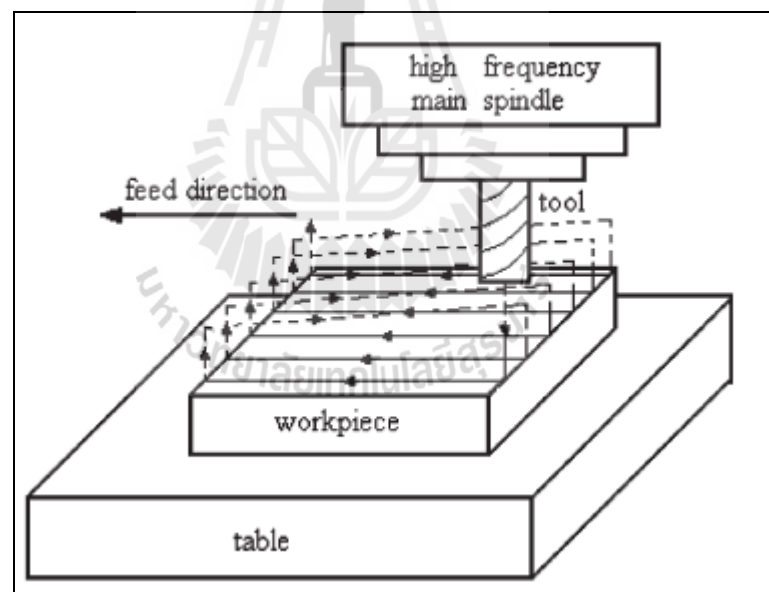
```

1 BEGIN PGM LONK MM
2 BLK FORM0.1 Z X0 Y0 Z0
3 BLK FORM0.2 X0 Y0 Z0
5 TOOL CALL 2 Z S7000
6 L R F M06
7 L X105.0 Y-3.98 R FMAX M
8 L Z5.0 R FMAX M13
9 L Z1.0 R FMAX M
10 L Z-2.0 R F200 M90
11 L X-5.0 R F140 M90
12 L Z5.0 R FMAX M
13 L X105.0 R FMAX M
14 L Z1.0 R FMAX M
15 L Z-2.0 R F200 M90
16 L Y-3.96 R F140 M90
17 L X-5.0 R F M90
18 L Z5.0 R FMAX M
19 L X105.0 R FMAX M
20 L Z1.0 R FMAX M
21 L Z-2.0 R F200 M90
22 L Y-3.94 R F140 M90
23 L X-5.0 R F M90
24 L Z5.0 R FMAX M
25 L X105.0 R FMAX M
26 L Z1.0 R FMAX M
27 L Z-2.0 R F200 M90
28 L Y-3.92 R F140 M90
  
```



29 L X-5.0 R F M90
 30 L Z5.0 R FMAX M
 31 L X105.0 R FMAX M
 32 L Z1.0 R FMAX M
 33 L Z-2.0 R F200 M90
 34 L Y-3.9 R F140 M90
 35 L X-5.0 R F M90
 36 L Z150.0 R0 FMAX
 37 L R F M30
 38 END PGM LONK MM

โดยดอกกัทจะเคลื่อนไปตามทิศทางดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ทิศทางเคลื่อนที่ของดอกกัทสำหรับการทดสอบ

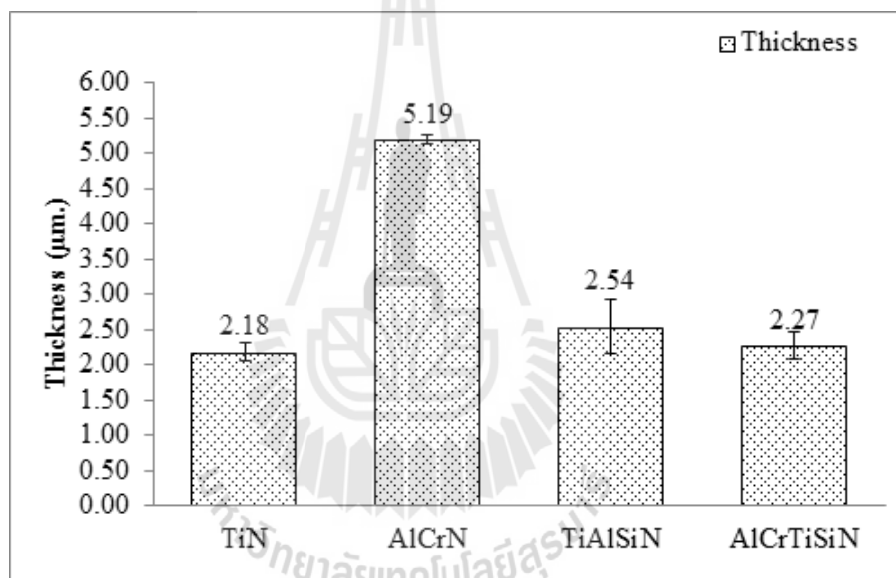
ภาคผนวก ข

ค่าความหนาของชั้นเคลือบจากการทดสอบ Calotest



ตารางที่ ข.1 ค่าความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

วัดครั้งที่	Thickness (μm .)			
	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN
1	2.30	5.23	2.42	2.23
2	2.19	5.22	2.22	2.10
3	2.04	5.12	2.98	2.47
avg	2.18	5.19	2.54	2.27
sd	0.13	0.06	0.39	0.19



รูปที่ ข.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

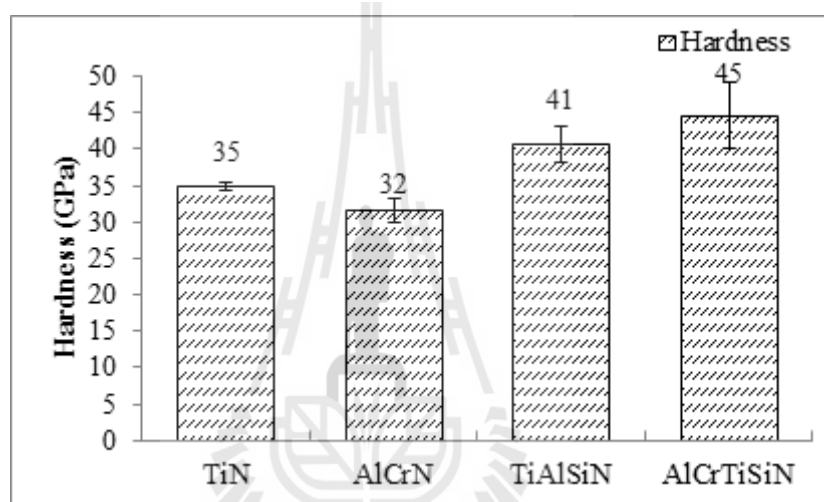
ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation)

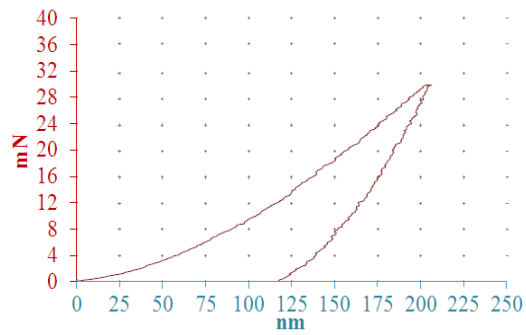
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

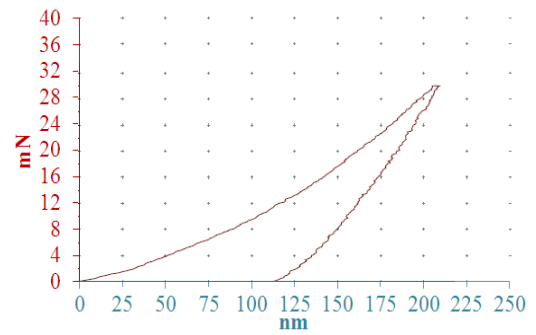
	Hardness (GPa)			
	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN
avg	35	32	41	45
sd	0.58	1.71	2.53	4.64



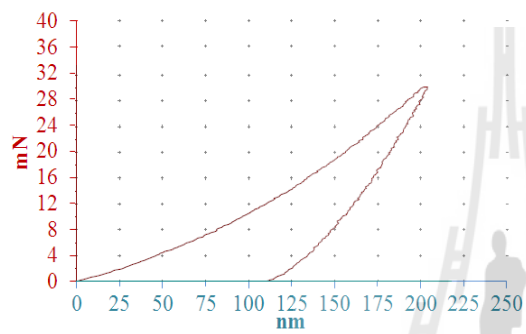
รูปที่ ค.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN



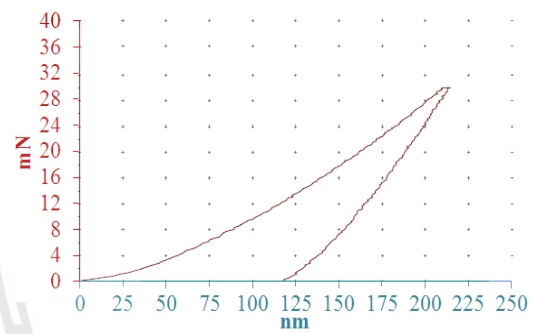
การวัดครั้งที่ 1



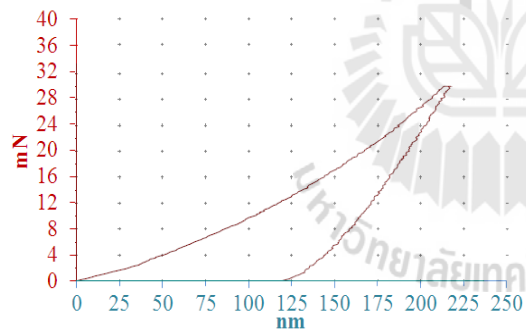
การวัดครั้งที่ 2



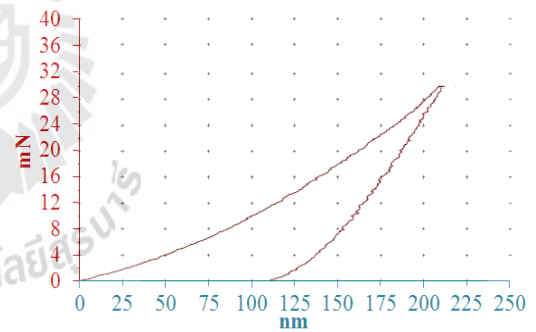
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4

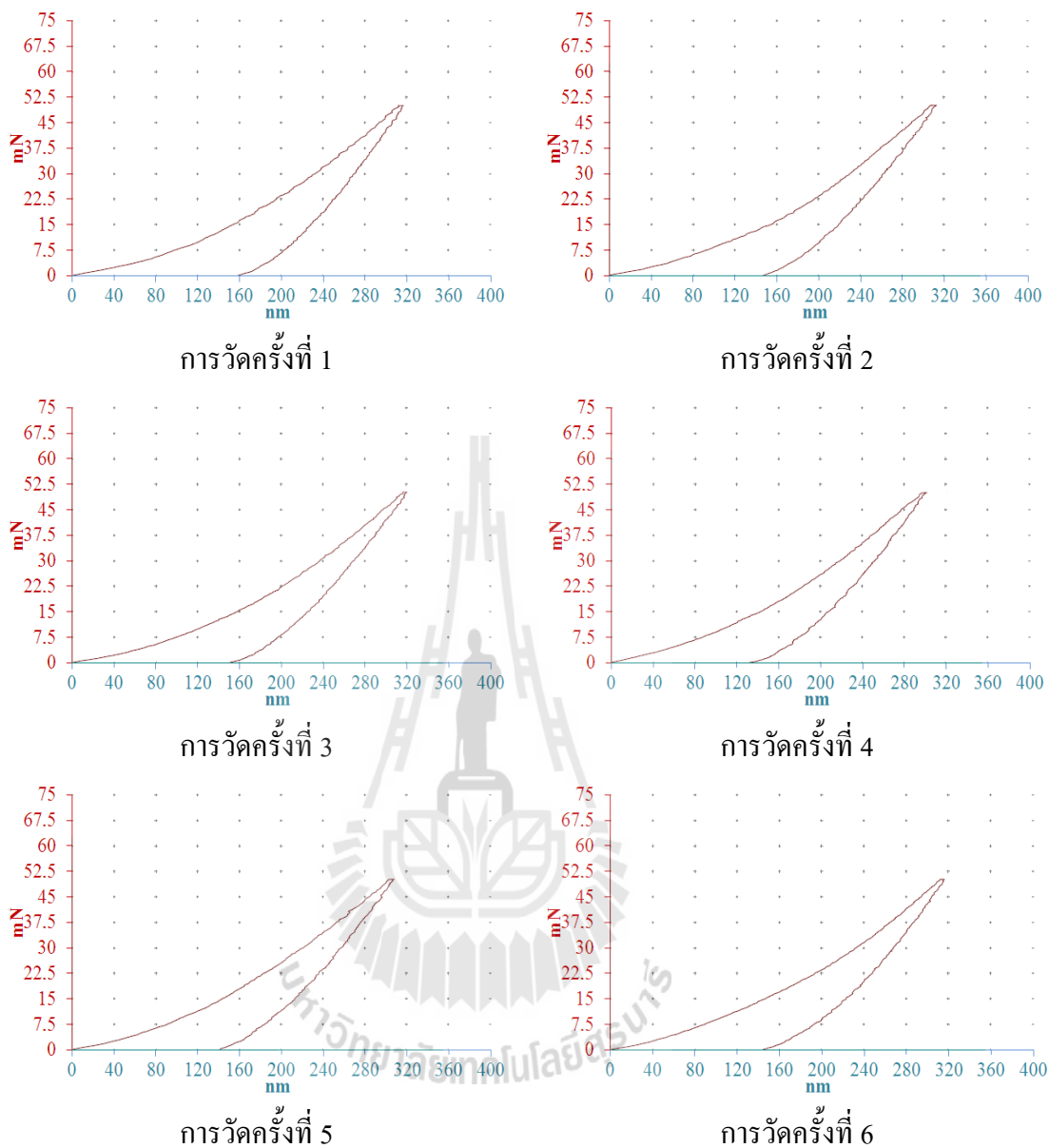


การวัดครั้งที่ 5

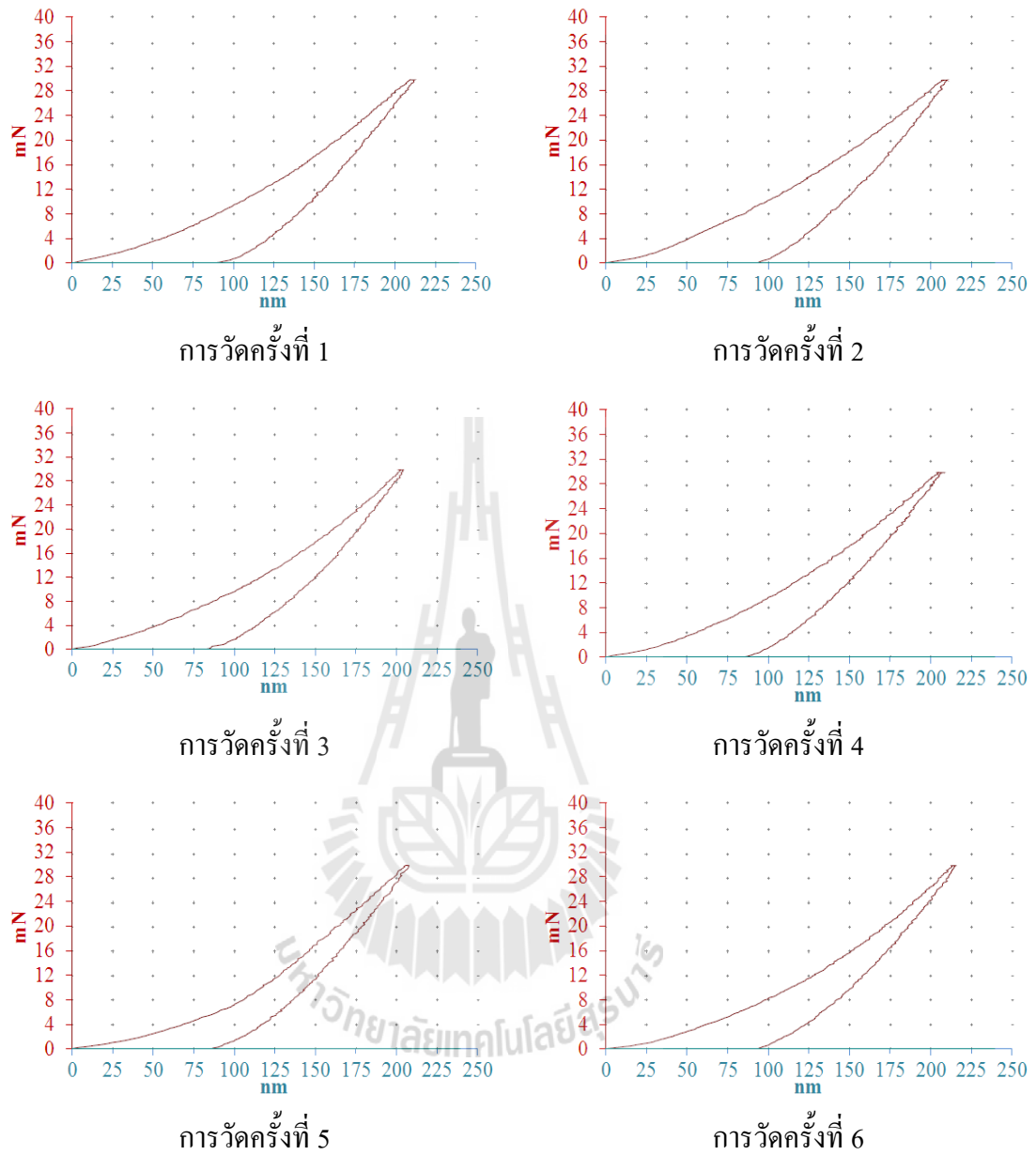


การวัดครั้งที่ 6

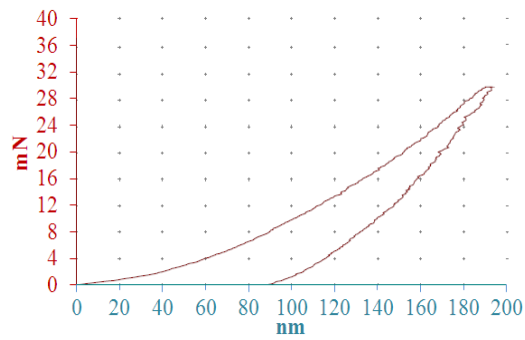
รูปที่ ค.2 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์



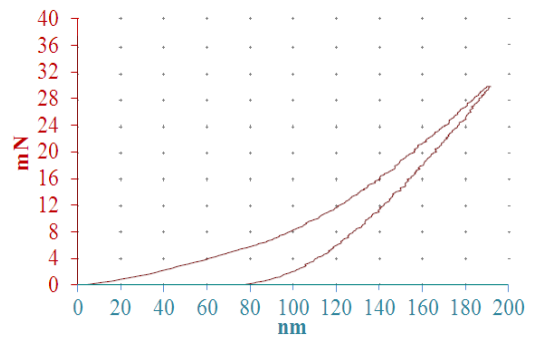
รูปที่ ก.3 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์



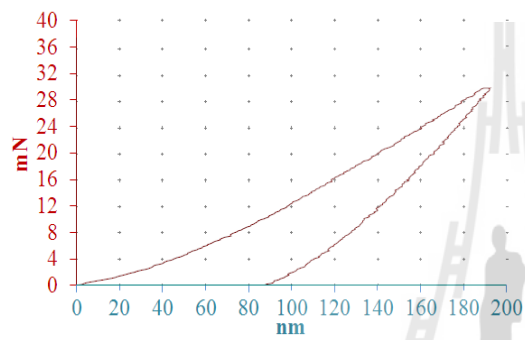
รูปที่ ค.4 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์



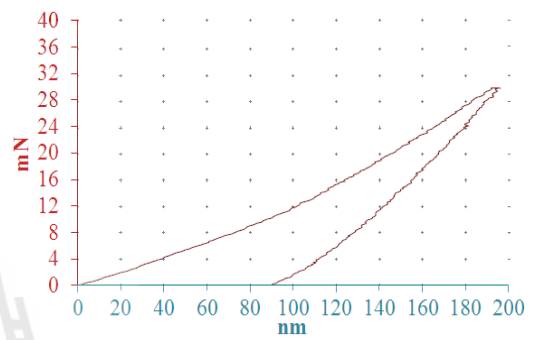
การวัดครั้งที่ 1



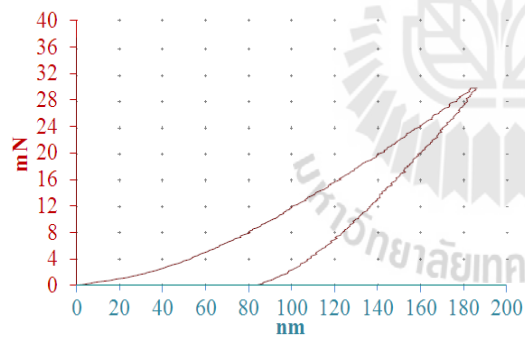
การวัดครั้งที่ 2



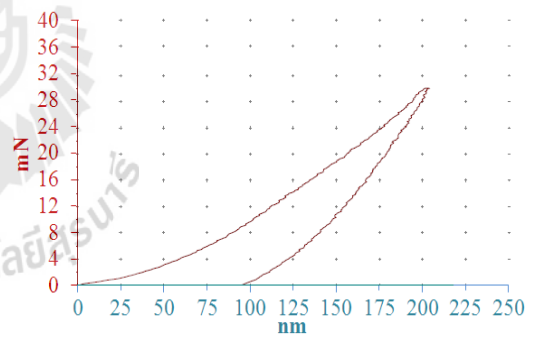
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4



การวัดครั้งที่ 5



การวัดครั้งที่ 6

รูปที่ ค.5 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอน
ไนไตรด์



ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด (Scratch test)

ตารางที่ ง.1 ค่า Lc1 และ Lc2 โดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ เคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

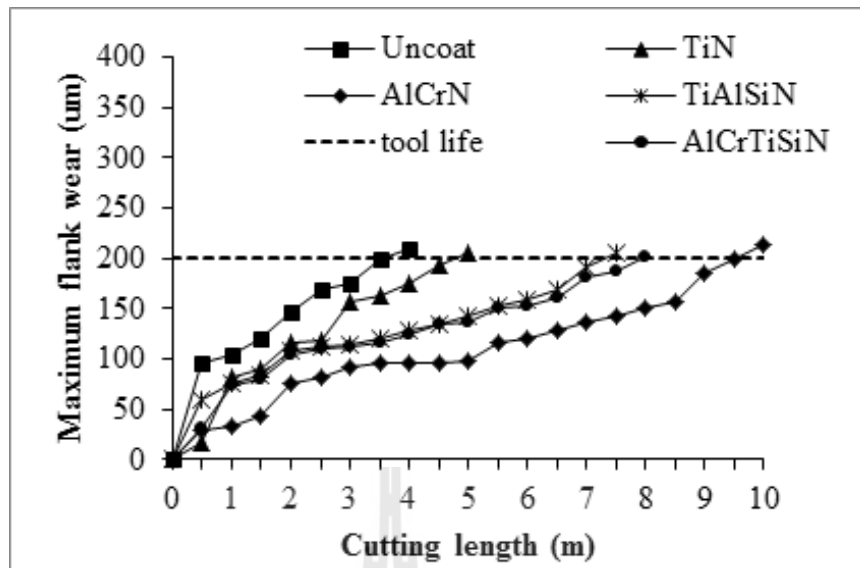
วัดครั้งที่	Lc1 (N)				Lc2 (N)			
	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN
1	52.8	92.8	36.6	119.6	87.5	0.0	129.8	0.0
2	57.5	87.4	25.4	113.7	88.9	0.0	125.4	0.0
3	47.2	91.0	22.0	106.5	76.1	0.0	121.6	0.0
avg	52.5	90.4	28.0	113.3	84.2	0.0	125.6	0.0
sd	5.2	2.8	7.6	6.6	7.0	0.0	4.1	0.0



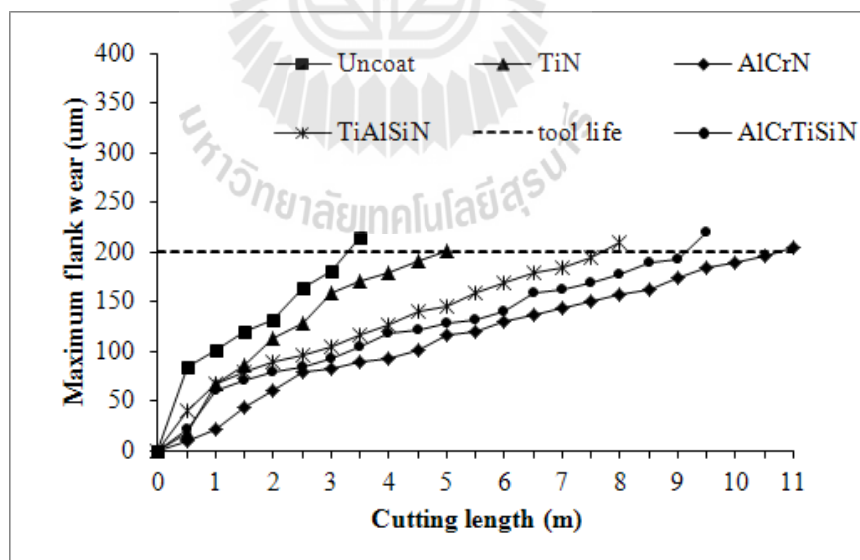
ภาคผนวก จ

ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบในระดับใช้งานจริง





รูปที่ จ.1 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 1 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN AlCrN TiAlSiN AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น



รูปที่ จ.2 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 2 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN AlCrN TiAlSiN AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น

ตาราง จ.1 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 1

ระยะ กัด	Uncoat					TiN					AlCrN					TiAlSiN					AlCrTiSiN				
	ค่าการสึกหรอ (μm .)			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm .)			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm .)			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm .)			avg	S D					
	วัดครั้งที่					วัดครั้งที่					วัดครั้งที่					วัดครั้งที่									
	(m.)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
0.5	95.	95.	95.	95.	0.	16.	16.	17.	16.	0.	29.	28.	29.	29.	0.	59.	59.	59.	59.	0.	30.	30.	30.	30.	0.
	10	34	27	24	12	23	09	23	52	62	17	89	43	16	27	27	89	92	69	37	12	81	98	64	46
1	104	104	105	104	0.	82.	82.	80.	81.	0.	34.	33.	33.	33.	0.	76.	76.	76.	76.	0.	74.	74.	74.	74.	0.
	.90	.79	.15	.95	18	54	39	99	97	85	09	46	90	82	32	23	49	15	29	18	29	90	52	57	31
1.5	119	119	120	119	0.	90.	92.	89.	90.	1.	43.	44.	43.	43.	0.	83.	83.	83.	83.	0.	80.	80.	80.	80.	0.
	.87	.78	.29	.98	27	77	12	17	69	48	21	07	15	48	51	42	51	09	34	22	09	18	44	24	18
2	145	145	146	145	0.	116	117	116	116	0.	75.	74.	74.	74.	0.	107	107	107	107	0.	104	104	104	104	0.
	.92	.76	.12	.93	18	.56	.09	.99	.88	28	21	65	02	63	60	.24	.67	.81	.57	30	.56	.23	.87	.55	32
2.5	170	168	169	169	0.	119	117	117	118	0.	81.	81.	82.	81.	0.	112	112	112	112	0.	109	109	109	109	0.
	.00	.61	.32	.31	70	.02	.89	.92	.28	64	41	99	12	84	38	.32	.09	.87	.43	40	.10	.01	.23	.11	11
3	174	173	175	174	0.	155	157	157	156	0.	92.	92.	92.	92.	0.	113	113	113	113	0.	112	112	112	112	0.
	.99	.87	.07	.64	67	.98	.22	.01	.74	66	01	82	17	33	43	.67	.21	.90	.59	35	.65	.46	.98	.70	26
3.5	198	198	199	199	0.	161	163	162	162	1.	95.	94.	95.	95.	0.	120	120	120	120	0.	116	117	116	116	0.
	.99	.79	.34	.04	28	.42	.94	.77	.71	26	67	91	09	22	40	.98	.02	.45	.48	48	.99	.12	.87	.99	13

ตาราง จ.1 ค่าการสึกหรอของดอกกักจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 1 (ต่อ)

4	208 .65	207 .09	210 .99	208 .91	1.9 6	174 .51	174 .08	175 .00	174 .53	0.4 6	95. 98	96. 12	95. 89	96. 00	0.1 2	128 .93	128 .61	128 .25	128 .60	0.3 4	124 .56	124 .73	124 .48	124 .59	0.1 3
4.5						193 .19	193 .24	194 .71	193 .71	0.8 6	96. 86	97. 23	96. 51	96. 87	0.3 6	135 .73	134 .92	135 .09	135 .25	0.4 3	133 .70	133 .26	133 .57	133 .51	0.2 3
5						204 .99	204 .81	205 .34	205 .05	0.2 7	97. 77	97. 00	96. 79	97. 19	0.5 2	143 .23	143 .79	143 .08	143 .37	0.3 7	137 .41	137 .05	137 .12	137 .19	0.1 9
5.5											115 .43	115 .10	115 .78	115 .44	0.3 4	152 .64	152 .76	152 .39	152 .60	0.1 9	150 .67	150 .42	150 .78	150 .62	0.1 8
6											118 .96	119 .12	119 .80	119 .29	0.4 5	158 .10	158 .01	157 .98	158 .03	0.0 6	153 .44	153 .80	153 .23	153 .49	0.2 9
6.5											129 .43	128 .92	128 .78	129 .04	0.3 4	168 .97	169 .42	169 .90	169 .43	0.4 7	161 .91	161 .12	161 .38	161 .47	0.4 0
7											136 .87	136 .54	136 .42	136 .61	0.2 3	191 .10	190 .99	190 .33	190 .81	0.4 2	181 .01	180 .99	181 .03	181 .01	0.0 2
7.5											142 .33	142 .18	143 .01	142 .51	0.4 4	205 .12	205 .60	205 .32	205 .35	0.2 4	187 .56	187 .31	187 .60	187 .49	0.1 6
8											150 .21	150 .13	150 .11	150 .15	0.0 5						201 .09	201 .67	201 .13	201 .30	0.3 2
8.5											156 .78	156 .51	155 .78	156 .36	0.5 2										

ตารางที่ จ.2 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2

ระยะ ดอก กัด เคลื่อน ที่ (ม.)	Uncoat					TiN					AlCrN					TiAlSiN					AlCrTiSiN				
	ค่าการสึกหรอ (μm) วัดครั้งที่			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm) วัดครั้งที่			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm) วัดครั้งที่			avg	S D	ค่าการสึกหรอ (μm) วัดครั้งที่			avg	S D					
	1	2	3			1	2	3			1	2	3			1	2	3			1	2	3		
	0.5	83. 30	83. 45	83. 51	83. 42	0. 11	17. 29	17. 34	17. 99	17. 54	0. 39	8.6 2	8.4 5	8.7 9	8.6 2	0. 17	40. 10	40. 00	41. 02	40. 37	0. 56	20. 10	21. 09	20. 97	20. 72
1	100 .52	100 .37	100 .60	100 .50	0. 12	67. 32	67. 81	67. 95	67. 69	0. 33	21. 00	21. 32	21. 89	21. 40	0. 45	67. 90	67. 11	67. 45	67. 49	0. 40	59. 22	59. 81	59. 17	59. 40	0. 36
1.5	119 .12	119 .78	120 .29	119 .73	0. 6	86. 09	86. 12	86. 08	86. 10	0. 02	43. 29	44. 07	43. 15	43. 50	0. 50	78. 27	78. 54	78. 81	78. 54	0. 27	70. 34	70. 11	70. 98	70. 48	0. 45
2	130 .00	131 .08	130 .87	130 .65	0. 6	112. .76	112. .31	112. .69	112. .59	0. 24	60. 79	60. 87	60. 23	60. 63	0. 35	89. 32	89. 10	89. 99	89. 47	0. 46	79. 36	79. 81	79. 42	79. 53	0. 24
2.5	164 .32	164 .21	164 .57	164 .37	0. 18	128. .54	128. .76	128. .09	128. .46	0. 34	78. 90	78. 54	78. 13	78. 52	0. 39	96. 41	96. 52	96. 79	96. 57	0. 20	84. 90	84. 27	84. 08	84. 42	0. 43
3	180 .21	180 .55	181 .08	180 .61	0. 44	159. .21	159. .09	159. .44	159. .25	0. 18	82. 10	82. 52	82. 00	82. 21	0. 28	104. .86	104. .92	104. .21	104. .66	0. 39	92. 04	92. 33	92. 68	92. 35	0. 32

ตารางที่ จ.2 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2 (ต่อ)

3.5	213 .78	213 .21	213 .98	213 .66	0.4	169 .66	169 .48	169 .83	169 .66	0.1 8	88. 97	89. 09	89. 32	89. 13	0.1 8	116 .40	116 .17	116 .52	116 .36	0.1 8	104 .81	104 .65	104 .12	104 .53	0.3 6
4						178 .91	179 .14	179 .13	179 .06	0.1 3	92. 50	92. 61	92. 95	92. 69	0.2 3	125 .79	125 .32	125 .41	125 .51	0.2 5	117 .47	117 .80	117 .32	117 .53	0.2 5
4.5						191 .29	191 .76	191 .21	191 .42	0.3 0	96. 80	97. 23	96. 51	96. 85	0.3 6	139 .91	139 .26	139 .77	139 .65	0.3 4	121 .91	121 .87	121 .02	121 .60	0.5 0
5						201 .91	200 .98	200 .43	201 .11	0.7 5	101 .45	101 .21	102 .09	101 .58	0.4 5	145 .23	145 .10	145 .09	145 .14	0.0 8	127 .52	127 .01	127 .26	127 .26	0.2 6
5.5											115 .80	115 .10	115 .78	115 .56	0.4 0	158 .10	158 .01	157 .98	158 .03	0.0 6	132 .11	132 .45	132 .01	132 .19	0.2 3
6											119 .98	119 .00	119 .80	119 .59	0.5 2	168 .97	169 .42	169 .90	169 .43	0.4 7	139 .92	140 .11	140 .09	140 .04	0.1 0
6.5											129 .11	128 .92	128 .78	128 .94	0.1 7	179 .24	179 .52	179 .09	179 .28	0.2 2	158 .03	158 .19	158 .24	158 .15	0.1 1
7											136 .80	136 .54	136 .42	136 .59	0.1 9	184 .30	184 .56	184 .22	184 .36	0.1 8	161 .00	161 .98	161 .22	161 .40	0.5 1
7.5											142 .37	142 .18	143 .01	142 .52	0.4 3	193 .70	193 .75	193 .72	193 .72	0.0 3	168 .37	168 .09	168 .79	168 .42	0.3 5
8											150 .45	150 .87	150 .11	150 .48	0.3 8	209 .91	209 .89	209 .68	209 .83	0.1 3	177 .25	177 .73	177 .83	177 .60	0.3 1

ตารางที่ จ.2 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2 (ต่อ)

8.5											156	156	155	156	0.6							189	189	189	189	0.4
											.98	.90	.78	.55	7							.65	.02	.90	.52	5
9											161	161	161	161	0.3							192	192	192	192	0.1
											.39	.22	.80	.47	0							.34	.46	.12	.31	7
9.5											173	173	173	173	0.4							219	219	219	219	0.1
											.60	.04	.91	.52	4							.52	.47	.73	.57	4
10											184	184	184	184	0.0											
											.39	.27	.33	.33	6											
10.											189	189	187	189	1.5											
5											.91	.87	.23	.00	4											
11											196	196	197	196	0.4											
											.20	.55	.02	.59	1											
11.											204	204	204	204	0.2											
5											.10	.39	.53	.34	2											

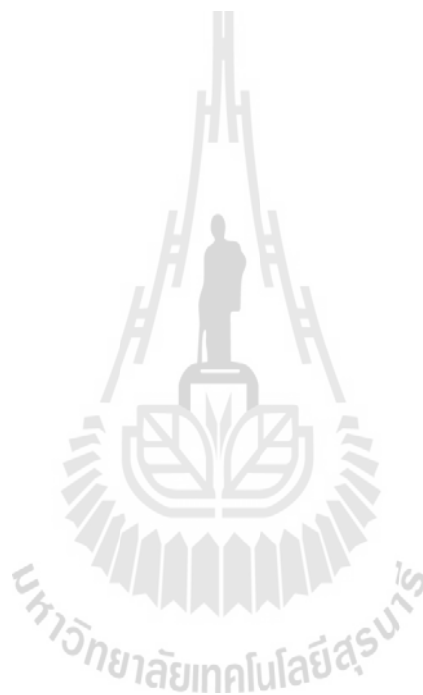


ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Jadesada Rujisomnapa, Surasak Surinphong, Pornwasa Wongpanya, **A Comparative Study of Wear and Oxidation Behaviors of End Mill Coated by PVD Coatings.** *Advanced Materials Research*, Vols. 785-786 pp. 858-863, 2013.



A Comparative Study of Wear and Oxidation Behaviors of End Mill Coated by PVD Coatings

Jadesada Rujisomnapa^{1,a}, Surasak Surinphong^{2,b}
 and Pornwasa Wongpanya^{1,c}

¹School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

² NanoShield PVD Hard Coatings, Samutprakarn, Thailand

^a b5024070@hotmail.com, ^b surasak@nanoshield-pvd.com, ^c pornwasa@sut.ac.th

Keywords: Friction and Wear; Oxidation; Maximum Flank wear; TiN; AlCrN; TiAlSiN

Abstract. The objective of this research is to study wear behaviors of TiN, nanolaminated AlCrN and nanocomposite TiAlSiN coated on cemented carbide end mill deposited by cathodic arc physical vapor deposition methods in comparison with uncoated end mill. Wear behaviors were investigated by nanoindentation hardness test, scratch test and cutting test. Oxidation test was also done in air at temperatures of 700°- 900°C in order to evaluate resistance of oxidation. In the nanoindentation hardness and scratch tests, nanocomposite TiAlSiN coating exhibited higher hardness than TiN and nanolaminated AlCrN coatings. The nanolaminated AlCrN coating represented the highest adhesion ability in terms of critical load and the lowest coefficient of friction in comparison with the TiAlSiN and TiN coatings, respectively. The cutting performance, represented in terms of maximum flank wear as a function of cutting length, was found to be highest in the AlCrN coating. Oxides of these coatings, i.e., TiO₂ for TiN, TiO₂ for TiAlSiN and Cr₂O₃ for AlCrN, generated at different temperatures of 700°, 800° and 900°C, respectively. From all of results, it is obvious that the AlCrN coating exhibited more excellent wear resistance and oxidation resistance than the uncoated end mill, TiN coating and TiAlSiN coating.

Introduction

It is well known that during service applications of cutting tools, they have to encounter not only forces that are required to cut, mill and machine specimens, but they have to receive a friction force at the interface between flank and surface of specimens that results in high temperature oxidation of cutting tools [1]. In order to enhance performance of cutting tools and to extend service life of cutting tools, the surface technology in particular for the physical vapor deposit (PVD) coatings, such as TiN, AlCrN, TiAlSiN and etc., have been widely used on the cutting tools because of their high hardness, low coefficient of friction (COF), and high wear resistance [2,3]. Many types of PVD coatings have been developed for protecting the cutting tools, such as, TiN (binary hard coating), AlTiN (with adhesive TiN), CrAlSiN (nanocomposite), TiAlSiN (nanocomposite) and etc. The advantages of using PVD coatings, mainly composed of aluminum and chromium, are that after service application they are oxidized and the products from oxidation are aluminium and chromium oxides. And, it is believed that such oxides are useful and would be used as a lubricant for avoiding wear of cutting tools because they have a low COF [4]. However, the performance of different PVD coatings still remains in question since they have been applied for cemented carbide end mill. For this reason, a comparative study of performance of PVD coatings, i.e., TiN, AlCrN and TiAlSiN films, has been evaluated in this paper. Such performance in terms of wear and oxidation behaviors is studied by using nanoindentation hardness test, scratch test, cutting tool test and oxidation test.

Experimental

Samples used in this study were two sets. The first sets of samples were cemented carbide end mills (6wt% Co and 94wt% WC, ISO K10) with a diameter of 8 mm and 2-flute flat that were selected to be a substrate material for coatings. The end mills were coated with TiN, AlCrN and TiAlSiN coatings

by cathodic arc physical vapor deposition methods (CAPVD). All of the coatings were synthesized in an industrial coating machine developed by NanoShield PVD Hard Coating Thailand. The nanolaminated AlCrN (AlN/CrN) coating was synthesized by an unconventional method, using separate targets of pure Al and pure Cr instead of using AlCr alloy targets which is normally done in the hard coating industry. The coated end mills were used for evaluating cutting performance by the high speed machining of AISI D2 with a hardness of 58 HRC and cutting conditions were shown in Table 1. The cutting performance was observed by evaluating tool flank wear as a function of cutting length. Measurement of tool flank wear was repeated for three times and the measurement values were averaged as the final values. A tool life criterion of maximum flank wear was determined at 200 μm in accordance with ISO 3002/1 [5].

Table 1 Cutting conditions used in this study.

Condition	Contents
Spindle revolution (rpm)	7,000
Feed per tooth (mm/tooth)	0.01
Cutting speed (m/s)	2.90
Radial depth of cut (mm)	0.02
Axial depth of cut (mm)	2.00
Coolant type	Flood coolant (wet)

The second sets of samples were also the cemented carbide ISO K10, but they were prepared to be a cylindrical with a diameter of 20 mm and thickness of 2 mm. Subsequently, they were coated with the same coatings as in the sets of end mills. These sets of samples were used to observe wear behavior in terms of nanoindentation hardness, adhesion ability by nanoindentation hardness test and scratch test. For oxidation experiments of samples, samples were placed in a tube furnace at temperatures between 700°C and 900°C for 1 hour in air environment. After oxidation test, phase formations of samples were characterized with X-ray diffraction using $\text{CuK}\alpha$ radiation. Scratch resistance of samples, which represented in terms of critical loads, i.e., Lc1 and Lc2, was analyzed with the scratch tester (CSM Instruments) at initial and final loads between 0.9 and 150 N. Nanoindentation tester (CSM instruments) was used to measure the hardness of coatings equipped with Berkovich diamond indenter.

Results and Discussion

Wear Behaviors. Table 2 shows the thickness and hardness of TiN, AlCrN and TiAlSiN coatings. Coatings thickness was obtained from CSM Calotest machine with LOMO PMT-3M microscope. It can be seen that the hardness value of TiAlSiN coating was higher than those of TiN and AlCrN coatings, even though the thickness of TiAlSiN coating was much lower than that of AlCrN coating. The reason why the TiAlSiN coating exhibited higher hardness than the other coatings was that nano-sized crystallites of TiAlN were embedded in amorphous matrix of Si_3N_4 and were homogeneously distributed throughout the coating. The hardness of TiAlSiN coating increased, because interfaces between TiAlN and Si_3N_4 increased [6, 7]. Moreover, a combination of different phases, i.e., TiAlN and Si_3N_4 , inhibited the crack propagation in the amorphous matrix of Si_3N_4 under high applied load during service time [6].

Table 2 Thickness and Hardness of TiN, AlCrN, and TiAlSiN coatings.

	TiN	AlCrN	TiAlSiN
Thickness (μm)	2.18	5.19	2.54
Hardness (GPa)	35	32	41

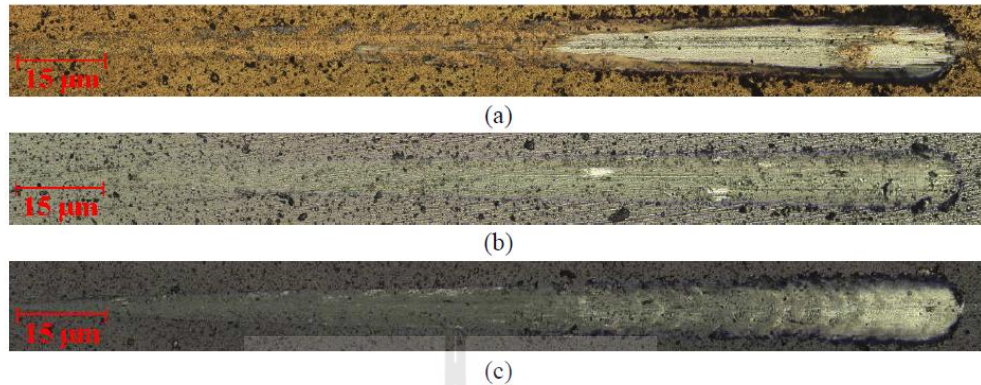


Fig. 1: Panorama optical images of the wear trace on the (a) TiN (b) AlCrN and (c) TiAlSiN coatings

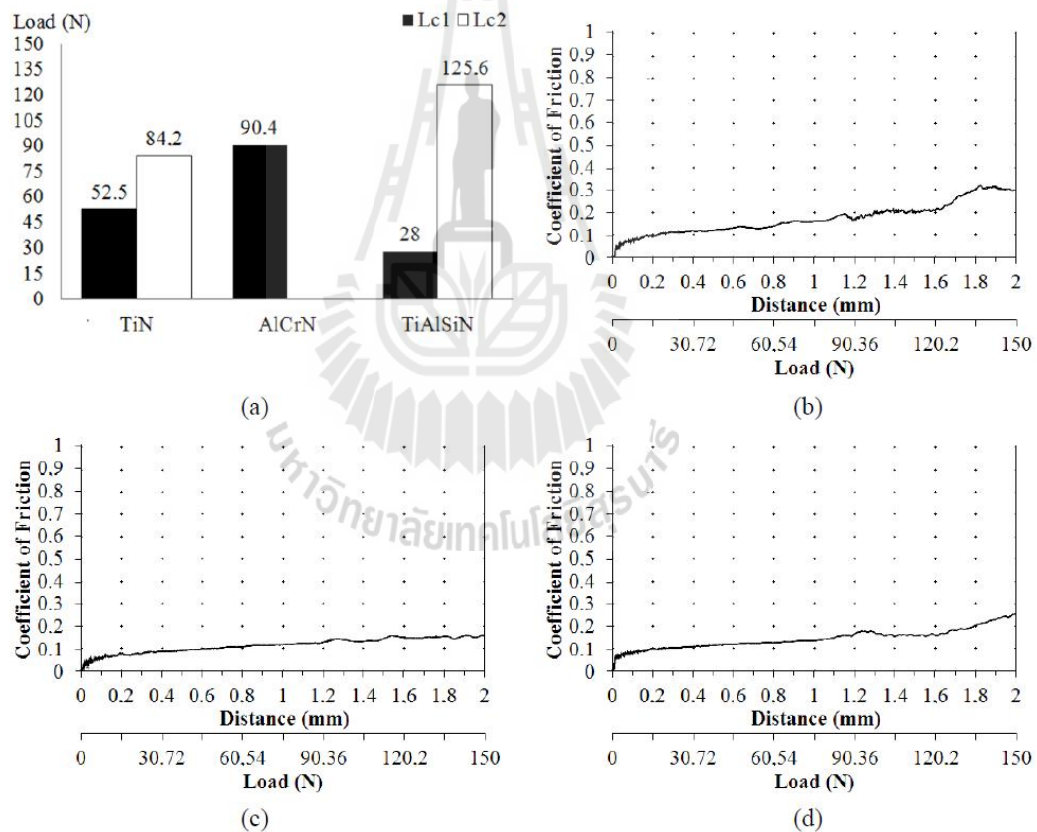


Fig. 2: Results from scratch test (a) comparative critical loads of coatings and coefficient of friction (COF) of (b) TiN, (c) AlCrN and (d) TiAlSiN coatings

Fig. 1 shows the wear trace of the coatings from the scratch test. It revealed that the delamination of TiN coating was more visible than those of TiAlSiN and AlCrN coatings corresponding to the critical loads as shown in Fig. 2. It can be seen that the smooth wear trace of AlCrN coating was more pronounced than those of TiN and TiAlSiN coatings. By considering the wear trace related to the hardness of all coatings, it can be seen that the TiAlSiN coating displayed a larger delamination than the AlCrN coating, even though the TiAlSiN coating exhibited higher hardness than the AlCrN

coating. This means that the hardness could not be used properly to interpret the wear resistance in this study. The critical loads are used for interpretation of coating damage, i.e., the critical load at which the first crack appears (Lc1) and the critical load at which the full delamination of coating occurs (Lc2). The AlCrN coating was less sensitive to the first crack initiation than the TiN and TiAlSiN coatings, as shown by the higher Lc1. The full delamination (Lc2) of AlCrN coating disappeared even though the applied load increased up to 150 N (Lc2 exceeds 150 N). Even though CSM scratch tester can apply load up to 200 N but in practice the load is usually limited to 100 - 150 N. Using 150 N load can prolong the life of the indenter tip used in the scratch tester. Anyhow, Lc2 exceeding 150 N can be considered as a rare phenomenon also. The reason for disappearing of the full delamination of the AlCrN coating would be from its low coefficient of friction (COF). This means that the AlCrN coating would be a good lubricant due to the COF of AlCrN coating was lower than those of TiN and TiAlSiN coatings as shown in Fig. 2 (b)-(d). From Fig. 2(b)-(d), the scratch resistance could be ranked in the order from the best to the worst one as followings, the AlCrN, TiAlSiN and TiN coatings, respectively by considering the COF that is corresponded with the wear trace as shown in Fig. 1.

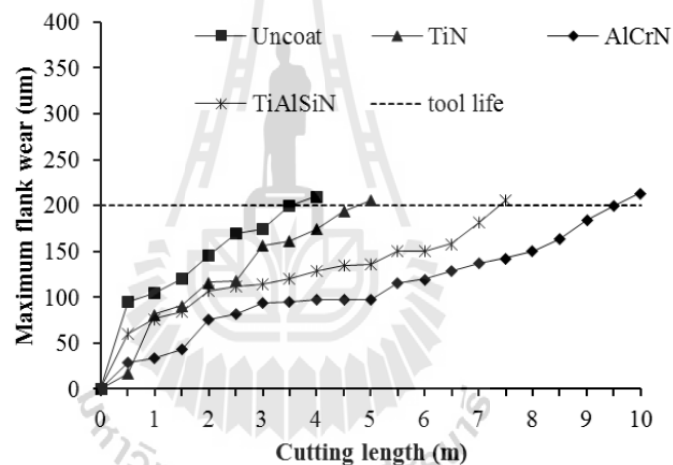


Fig. 3: The maximum flank wear as a function of cutting length for uncoated end mill, TiN, AlCrN, and TiAlSiN coated end mills.

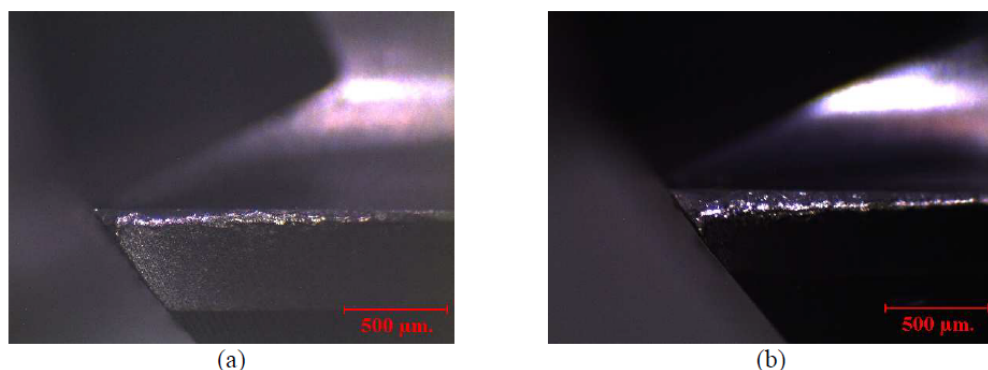


Fig. 4: Flank faces of AlCrN and TiAlSiN coatings at a cutting length of 7.5 m.

The tool life of uncoated end mill, TiN, AlCrN, and TiAlSiN coated end mills were evaluated by the cutting tool testing. And, the tool life was represented in terms of the maximum flank wear as a function of cutting length. Fig. 3 shows the maximum flank wear patterns as a function of cutting length for uncoated end mill, TiN, AlCrN, and TiAlSiN coated end mills under flooded coolant

environments. From the cutting tool testing, it can be seen that the tool life of AlCrN coating was about 9.50 m and it was higher than those of TiAlSiN and TiN end mills and uncoated end mill at 7.50, 5.00 and 3.50 m, respectively. This is because the COF of AlCrN coating was lower than those of the TiN and TiAlSiN coatings, as previously described by Fig. 2 (b)-(d). A comparative flank face of AlCrN and TiAlSiN coatings at a cutting length of 7.50 m was shown in Fig. 4. Obviously, the flank face of AlCrN coating exhibited lower damage than that of TiAlSiN coating. As can be seen in Fig. 3, the maximum flank wear at the cutting length of 7.50 m for the AlCrN coating was at 142 μm , but such value for the TiAlSiN coating was above the tool life criterion at 205 μm . Therefore, the AlCrN coating was the best for wear resistance. The results from the cutting tool testing showed the same trend of wear behaviors as shown in the scratch test. From those behaviors, it might be said that the coatings, i.e., TiN, TiAlSiN and AlCrN, are necessary for extending the tool life of end mill.

Oxidation Behaviors. By considering a relation between temperature generated during cutting and speed of cutting tool, since the cutting speed increased, the cutting temperature of interface between flank and specimen would be increased. Although the coolant (combined lubricant) was used in the cutting process, the cutting temperature would be increased up to 920°C at a cutting speed of 2.50 m/s [3]. In this research, the applied cutting speed was about 2.90 m/s; therefore, the cutting temperature would be higher than 920 °C. Since the cutting tools were received the load force for long time, the cutting temperature of tools would be increased. Then, the oxidation reaction would be appeared at the cutting temperature of tools in the oxygen environment [8-10]. Thus, in this study the simulation of oxidation test has been done in the tube furnace at temperatures between 700° and 900°C in air to observe the oxidation behaviors of TiN, AlCrN and TiAlSiN coatings. XRD patterns of coatings were shown in Fig. 5.

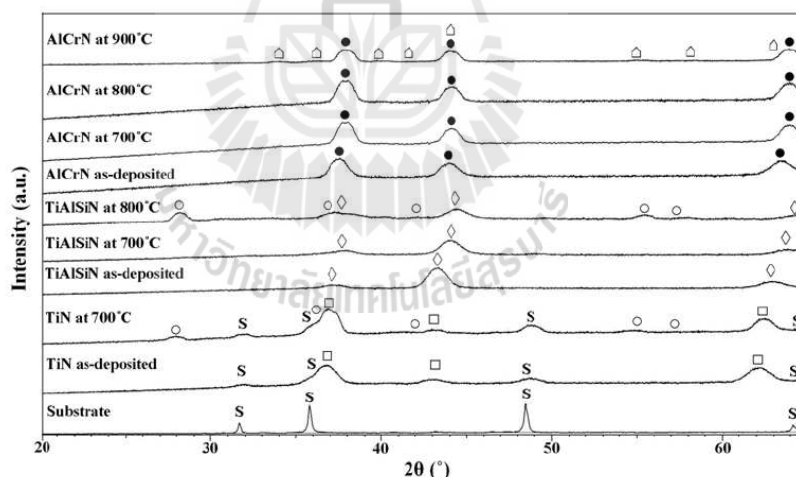


Fig. 5: X-ray diffraction patterns of coatings after oxidation for 1 h in air: (●) AlCrN coating peak; (□) TiAlSiN coating peak; (◇) TiAlN coating peak; (○) TiO₂ peak; (△) Cr₂O₃ peak; (S) Substrate peak.

For the TiN coating, the TiO₂ peaks started to appear after oxidation at 700°C. For the TiAlSiN coating, only the TiAlN peaks appeared, whereas the Si peaks disappeared. The reason for disappear of the Si peaks is that the Si elements changed to be a Si₃N₄ phase and such phase is an amorphous Si₃N₄ matrix [7]. The TiO₂ peaks generated at 800°C for the TiAlSiN coating. On the other hand, the AlCrN coating remain unchanged at temperatures between 700° and 800°C, the Cr₂O₃ peaks started to appear after oxidation at 900°C. From the XRD results of Fig. 5, the AlCrN coating exhibited higher oxidation resistance than the TiAlSiN and TiN coatings, respectively. The reason why the AlCrN coating showed high oxidation resistance would be from its dense oxide mixture layers of Cr₂O₃ and Al₂O₃ preventing further oxidation [4]. Moreover, those oxides are well known as a solid lubricant for wear resistance [9, 10]. On the other hand, the hardness of TiAlSiN (41 GPa) and TiN (35 GPa)

coatings were higher than that of AlCrN (32 GPa) coating, but the tool life of TiAlSiN coating was lower than the AlCrN coating. It can be described that the formed Ti, Cr, and Al oxides showed different effects. For the formed Cr and Al oxide films, they acted as the thermal protective and enhanced lubrication ability, while the formed Ti oxide film increased wear and friction [11].

Summary

- From the hardness and scratch tests, the hardness of coatings was consecutively ranked from the highest to the lowest as followings: nanocomposite TiAlSiN, nanolaminated AlCrN and conventional TiN coatings. However, the hardness would not be used properly for prediction of wear resistance because the TiAlSiN coating exhibited higher delamination than the AlCrN coating. The reason for better wear resistance of the AlCrN was that it showed lower coefficient of friction than TiN and TiAlSiN coatings.
- From the cutting tool tests, the AlCrN coatings showed the lowest damage after the maximum flank wear reached 200 μm . From the oxidation tests, the AlCrN coating remained higher oxidation resistance than TiAlSiN and TiN coatings. Tool life of end mills was successfully increased by PVD coatings such as TiN, AlCrN, and TiAlSiN coatings.
- However, two characteristics of coating have been further studied. Firstly, the effect of thickness on wear rate. It is questionable if the thickness of TiAlSiN coating is as equal as the thickness of AlCrN, will the wear rate be improved. Secondly, effect of coating's structure - Nanolaminated AlCrN, even though it exhibits the same hardness as the conventional AlCrN but theoretically the nanolayers of AlN/CrN should show the different behavior of wear, oxidation and crack propagation. This can be a subject for further study.

Acknowledgements

The authors would like to thank Suranaree University of Technology, National Research Council of Thailand for fund supporting this project under contract no. SUT7-713-55-24-12, and CSM Instruments Company Switzerland for supporting the scratch and nanoindentation hardness tests.

References

- [1] S.Y. Hong and Y. Ding: *Int J Mach Tool Manu* Vol. 41 (2001), p. 1417–1437.
- [2] Y. Birol, D. Isler: *Wear* Vol. 270 (2011), p. 281–286
- [3] C.L. Chang, J.W. Lee and M.D. Tseng: *Thin Solid Films* Vol. 517 (2009), p. 5231-5236.
- [4] W.Y.H. Liew, S. Dayou, M.A.B. Ismail, N.J. Siambun and J. Dayou: *Dry Sliding Behaviour of AlCrN and TiN Coatings* (Trans Tech Publications, Switzerland 2012).
- [5] J.Y. Heo, S.H. Cho, T.J. Je, K.H. Kim, H.W. Lee and M.C. Kang: *Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 21 (2011), p. s83–s87
- [6] D. Yu, C. Wang, X. Cheng and F. Zhang: *Thin Solid Films* Vol. 517 (2009), p. 4950–4955.
- [7] M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim: *Surf. Coat. Tech.* Vol. 202 (2008), p. 5621–5624.
- [8] Information on http://www.ateam.zcu.cz/Tribological_behaviour-presentation.pdf
- [9] J.L. Endrino, G.S. Fox-Rabinovich and C. Gey: *Surf. Coat. Tech.* Vol. 200 (2006), p. 6840–6845.
- [10] J.L. Mo, M.H. Zhu, B. Lei, Y.X. Leng and N. Huan: *Wear* Vol. 263 (2007), p. 1423-1429.
- [11] J.L. Mo and M.H. Zhu: *Tribol. Int.* Vol. 42 (2009), p. 1758-1764.

ประวัติผู้เขียน

นายเจษฎา รุจิสมนภา เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน พุทธศักราช 2532 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีพุทธศักราช 2549 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2553 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2553 โดยได้รับทุนสำหรับผู้มีศักยภาพจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช. ประจำปี 2554-2555 ผ่านมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

