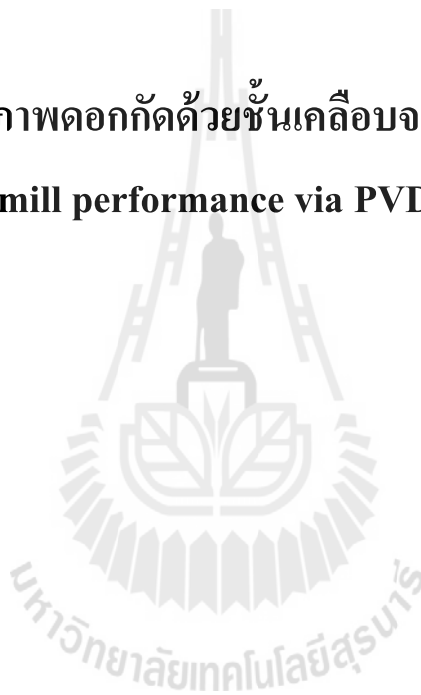


รหัสโครงการ SUT7-713-55-24-12



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพดอกกัดด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางฟิสิกส์
(Increase of end mill performance via PVD surface coating)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพดอกกัดด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางฟิสิกส์
(Increase of end mill performance via PVD surface coating)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวศา วงศ์ปัญญา

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายสุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ประจำปี
งบประมาณ พ.ศ. 2555 เรื่อง “การเพิ่มประสิทธิภาพดอกกั้วด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางฟิสิกส์” และ
ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่เสียสละเวลา ทำหน้าที่ตรวจข้อเสนอโครงการ และตรวจร่างรายงานการ
วิจัยฉบับสมบูรณ์

พรวสา วงศ์ปัญญา
มกราคม 2557



บทคัดย่อ

การเพิ่มประสิทธิภาพดอกกัดด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางฟิลิกส์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพดอกกัดด้วยชั้นเคลือบจากวิธีไอทางฟิลิกส์แบบคาโทดิกอาร์ค (Cathodic arc) คือ ฟิล์มอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) เปรียบเทียบกับดอกกัดที่ไม่ได้เคลือบ ประสิทธิภาพของฟิล์มถูกศึกษาโดยการทดสอบความแข็งระดับนาโน การทดสอบความต้านทานต่อการชุบกัด และการทดสอบการใช้งานจริง สำหรับการทดสอบความแข็งระดับนาโนและการทดสอบความต้านทานต่อการชุบกัดพบว่า ฟิล์ม AlCrTiSiN มีความแข็งสูงสุดและมีความต้านต่อการแตกและหลุดล่อน จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพบว่าฟิล์ม AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าฟิล์ม AlCrN สำหรับการทดสอบกัดผิวพบว่าฟิล์ม AlCrN มีอายุการใช้งานสูงกว่าฟิล์ม AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN ถึงสองเท่า สำหรับการทดสอบการเกิดออกซิเดชันออกไซด์เริ่มต้นของฟิล์ม AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN คือ TiO_2 และ Cr_2O_3 สำหรับฟิล์ม AlCrN จากผลทั้งหมดเห็นได้ชัดเจนว่าฟิล์ม TiN , TiAlSiN และ AlCrTiSiN มีความสามารถในการต้านต่อการสึกหรอต่ำกว่าฟิล์ม AlCrN

Abstract

Increase of end mill performance via PVD surface coating

The objective of this research is to study increasing efficiency of cemented carbide end mill with AlCrTiSiN, TiAlSiN, TiN and AlCrN coated by cathodic arc physical vapor deposition methods in comparison with uncoated end mill. A performance of coating was evaluated by nanoindentation test, scratch test, cutting test and oxidation test in comparison with uncoated end mill. From the nanoindentation hardness and scratch test, the AlCrTiSiN film was helpful to resist crack and delamination of coating and it showed the highest hardness. From the coefficient of friction (COF) results, AlCrTiSiN, TiAlSiN and TiN coating exhibited higher COF than AlCrN coatings. From the cutting test, the maximum flank wear of AlCrN film was about two times higher than that of the AlCrTiSiN, TiAlSiN and TiN coated and uncoated end mill resulting in tool life extension. From the oxidation test, the first oxide of AlCrTiSiN, TiAlSiN and TiN film generated after service life was a titanium dioxide (TiO_2) and Cr_2O_3 for AlCrN. From all of results, it revealed that the uncoated, TiN film, TiAlSiN film and AlCrTiSiN film end mills exhibited lower wear resistance than the AlCrN coated end mills.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลักษณะการเกิดการสึกหรอ	4
2.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition)	6
2.3 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest	7
2.4 การทดสอบการสึกหรอ	7
2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบของสารประกอบ	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	13
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	13
3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	13
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	14
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	21
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ	24
3.2.2 การหาค่าความหนาของชั้นเคลือบ	25
3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง	25

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.4 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ	26
3.2.5 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 คุณลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบ	28
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10	28
4.1.2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน WC-Co เกรด K10	28
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2	31
4.1.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2	32
4.2 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ	33
4.2.1 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน	33
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด	34
4.2.3 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เกรด K10 ที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบไฮดรอกไซด์ทางฟิลิกส์	36
4.3 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง	39
4.3.1 ผลการทดสอบการกัดผิวด้วยเครื่อง CNC	39
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัด	42
4.3.3 ประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวด้วยไฮดรอกไซด์ทางฟิลิกส์	44
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะในการทดลองต่อไป	45
5.1 สรุป	45
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลองต่อไป	46
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก: โค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC	51
ภาคผนวก ข: ค่าความหนาของชั้นเคลือบจากการทดสอบ Calotest	54
ภาคผนวก ค: ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน	56
ภาคผนวก ง: ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบในระดับใช้งานจริง	61
ภาคผนวก จ: ส่วนหนึ่งของรายงานการวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	69

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

ประวัติคณะผู้วิจัย

85



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2	13
3.2 ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN	25
4.1 ค่าความหยาบเฉลี่ยของแผ่น WC-Co เกรด 10	29
4.2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน	33
4.3 ค่า Lc1 และ Lc2 ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN	35
ข.1 ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN	55
ค.1 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN.	57
ง.1 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 1	63
ง.2 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2	66



สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 สาเหตุของการเสื่อมประลัยของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม	5
2.2 ประเภทของการสึกหรอ	5
2.3 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest	7
2.4 แสดงลักษณะการทดสอบการสึกหรอ	8
2.5 วิธีการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flank wear) ตามมาตรฐาน ISO 3685	9
2.6 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle	10
2.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ TiAlN และ TiAlSiN	11
3.1 เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน	14
3.2 เครื่องวัดความหยาบพื้นผิวแบบใช้แสง	15
3.3 เครื่องอุตสาหกรรมโซนิก	15
3.4 กระจายทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200	16
3.5 เตาอบชิ้นงานแบบดั้งเดิม	16
3.6 เครื่องเคลือบผิวด้วยไอระเหยทางฟิสิกส์	17
3.7 เครื่องกัดซีเอ็นซีหือ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16	17
3.8 เครื่องวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindenter)	18
3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด (Scratch tester)	18
3.10 เตาอบแบบท่ออนอน (Tube furnace)	18
3.11 เครื่อง Calotest	19
3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ	19
3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	20
3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	20
3.15 เครื่อง X-ray Diffraction	21
3.16 การดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง	22
3.17 การดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ	23
3.18 การหาความหนาชั้นเคลือบ	23
3.19 ลักษณะของดอกกัด (End mill)	24

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.1 โครงสร้างจุลภาคของ WC –Co เกรด K10 ที่กำลังขยาย 1500x	28
4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนการอบชุบทางความร้อน	32
4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI D2 หลังการอบชุบทางความร้อน	32
4.4 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN	34
4.5 รอยหักงอจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN	35
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN	36
4.7 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	37
4.8 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	38
4.9 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiAlSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	38
4.10 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	39
4.11 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น	40
4.12 รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัด ก) ไม่เคลือบ ข) TiN ค) AlCrN ง) TiAlSiN และ จ) AlCrTiSiN หลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4 เมตร	41
4.13 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัดของดอกกัด ที่ผ่านการเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN	43
4.14 ประสิทธิภาพของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบโดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) หลังทดสอบกัดผิว	44
ก.1 ทิศทางเคลื่อนที่ของดอกกัดสำหรับการใช้ในการทดสอบ	53
ค.1 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์	57

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
ค.2 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์	58
ค.3 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบ ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์	59
ค.4 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบ อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์	60
ง.1 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 1 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมัน เป็นสารหล่อเย็น	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เทคโนโลยีการปรับปรุงพื้นผิวโลหะ (Surface modification of metal and its alloy) ได้รับความสนใจในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนไบเมทัลสำหรับงานกลึง ใส ตัด เจาะ ที่นำไปใช้งานรับการเสียดสี (Abrasion) การสึกหรอ (Wear) และการกัดกร่อน (Corrosion) เช่น ดอกกัด ดอกเจาะ เป็นต้น โดยชิ้นส่วนดังกล่าว ต้องการความแข็งที่ผิวเพื่อป้องกันการเสียดสี และการสึกหรอที่ผิว (Santhanam, A.T., Tierney, P., 1998; Bahadur, S., 1996) โดยต้องผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งที่ผิวก่อนนำไปใช้งานด้วยวิธีดั้งเดิม เช่น คาร์บูไรซ์ซึ่ง คาร์โบไนตรายด์ซึ่งมีมลภาวะสูง และอันตรายเพราะมีส่วนประกอบในอ่างเกลือ สำหรับชุบผิวแข็งคือ ไซยาไนต์ นอกจากนี้ ในปัจจุบันมีกระบวนการอื่นๆ ที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย เช่น พลาสมาไนตรายด์ (Plasma nitriding) การเคลือบไอทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) และการเคลือบไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ที่เป็นกระบวนการที่สะอาด ปลอดภัยมากกว่าคาร์บูไรซ์ซึ่ง แต่ยังคงทำวิจัยและพัฒนาอีกมากในประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัย จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพด้านทานการสึกหรอ และการเกิดออกซิเดชันของดอกกัดทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เกรด K10 ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ (PVD) ดอกกัดทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เกรด K10 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมเครื่องมือตัด โดยชั้นเคลือบ 4 ชนิดที่สนใจศึกษา คือ อะลูมิเนียมโครเมียมไนตรายด์ (AlCrN), ไทเทเนียมไนตรายด์ (TiN), อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนตรายด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนตรายด์ (TiAlSiN) โดยชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิดเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบันและคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะทำให้การวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีในพื้นที่ผิวสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอาจนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเลือกชนิดชั้นเคลือบให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอและการเกิดออกซิเดชันของดอกกัดที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ถูกเคลือบผิวหรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิว ที่เลือกศึกษาเป็นเกรดที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมโดยรูปร่างของวัสดุพื้นที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น

ก) ดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 เพื่อใช้ทดสอบการตัดจริง

ข) แผ่นวัสดุที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10 เพื่อใช้ศึกษาค่าความแข็งและความต้านทานต่อการบดขีด

ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค เกรด AISI 304 ของบริษัท นาโนซิลด์ จำกัด เพื่อใช้วัดค่าความหนาของชั้นเคลือบ

1.3.2 นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 1.3.1 ไปเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ (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 นาโนซิลด์ จำกัด โดยชั้นเคลือบผิวแข็งทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ มีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้ คือ

ก) ความหนาของชั้นเคลือบ

ข) ความหยาบของพื้นผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (Roughness of substrate) เริ่มต้น

1.3.3 ตัวอย่างชิ้นงานในข้อ 1.3.1 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ ตามหัวข้อ 1.3.2 แล้ว จะถูกวิเคราะห์ และศึกษาเกี่ยวกับชั้นเคลือบตามหัวข้อต่อไปนี้

ก) ทดสอบการสึกหรอ (Wear test) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- การทดสอบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เพราะให้ข้อมูลที่ใกล้เคียงมากที่สุด โดยในภาวการณ์ใช้งานจริงทดสอบกับเครื่อง CNC มีตัวแปรที่ต้องกำหนดให้คงที่ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบและประมวลผล ดังนี้

- รอบการหมุน (Spindle revolution)
- ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)
- รัศมีความลึกของการตัด (Radial depth of cut)
- ความลึกในการตัด (Depth of cut)

- ความยาวในการตัด (Cutting length) ในแต่ละครั้ง
- ชนิดของโลหะที่ถูกกัดคือ เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด AISI D2
- ชนิดของสารหล่อเย็น

ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการวัดค่าการสึกหรอทุกครั้งจากระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบ โดยวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flank wear) จากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนแปลง

- การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้เลือก

การทดสอบการขูดขีด (Scratch test) เพื่อศึกษาความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบกับวัสดุพื้น และความต้านทานต่อการขีดข่วน

การวัดค่าความแข็งชั้นเคลือบในระดับนาโน (Nano indentation test)

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

ค) ทดสอบวัดค่าการสึกหรอและลักษณะของชั้นเคลือบโดย กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope, SM) และ X-ray Diffraction (XRD) ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอและการทดสอบการเกิดออกซิเดชันในข้อ ก) และ ข)

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

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงลักษณะการสึกหรอของดอกกัดทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์

1.4.2 ทราบถึงความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์

1.4.3 ทราบถึงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุพื้นทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

1.4.4 ในเชิงอุตสาหกรรม ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้มีผลประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposited)

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะการเกิดการสึกหรอ

การสึกหรอในวัสดุโลหะเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะเนื่องจากการใช้งานของโลหะโดยมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับโลหะชนิดอื่นเป็นระยะเวลาหนึ่งจนเกิดความเค้นสะสมบริเวณผิวสัมผัส และเมื่อความเค้นที่สะสมมีค่าเกินความเค้นจุดครากก็จะทำให้ชิ้นส่วนนั้นเกิดการเสียรูป หรือในบางกรณีความเค้นสะสมเกินความเค้นแรงดึงสูงสุด ส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะและอายุการใช้งานลดลง และสุดท้ายอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุได้ โดยปกติการสึกหรอสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

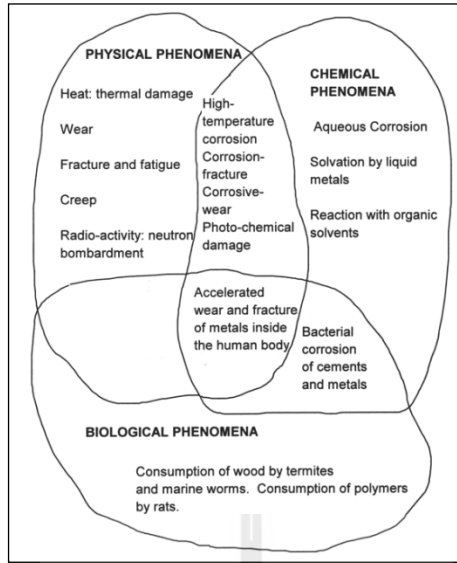
2.1.1 การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosion wear) โดยปกติเกิดจากชิ้นส่วนวัสดุสัมผัสกับของไหลที่มีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอย โดยสาเหตุสำคัญของการสึกหรอคืออนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในของไหล เกิดการไหลปะทะเข้าชนกับผิวของวัสดุ ทำให้ปรากฏความเค้น-ความเครียดสะสมบริเวณนั้น ทำให้บริเวณนั้นไม่สามารถทนต่อแรงพุงชนต่อไปได้จึงเกิดการหลุดลอกออก

2.1.2 การสึกหรอแบบขีดข่วน (Abrasion wear) มักเกิดจากการที่วัสดุไปสัมผัสกับอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มีความแหลมคม ทำให้เกิดการรอยขีดข่วนบนพื้นผิววัสดุ

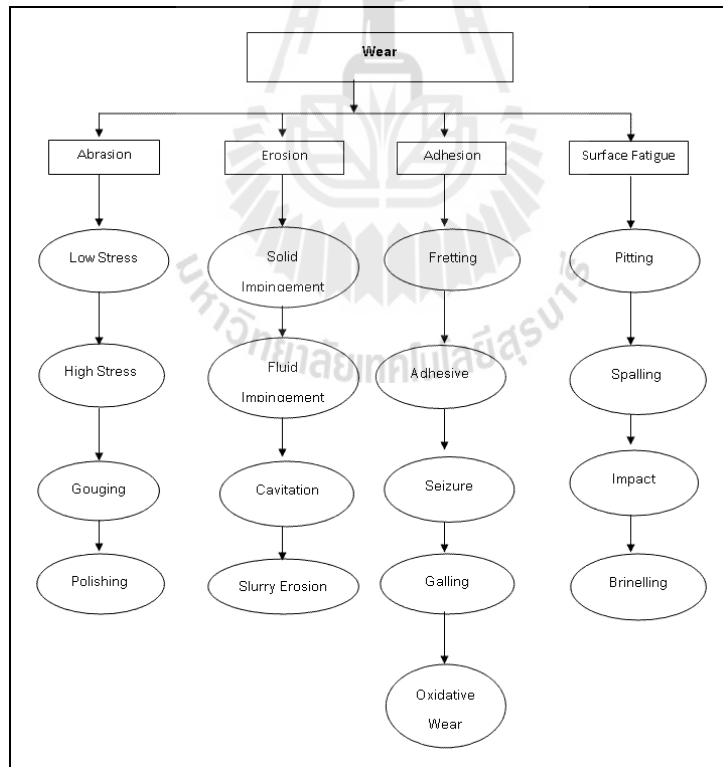
2.1.3 การสึกหรอด้วยความล้า (Surface fatigue wear) เกิดจากการได้รับแรงดึงและแรงกดกระทำซ้ำๆ สลับไปมาบนพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นส่วน 2 ชิ้น

2.1.4 การสึกหรอแบบเกาะติด (Adhesion wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปสัมผัสกันไปพร้อมกับการรับแรงกระทำ ทำให้เกิดความร้อนในบริเวณผิวสัมผัส จึงเกิดการหลอมติดกันและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตามบริเวณดังกล่าวไม่เสถียรจะเกิดการหลุดล่อนออกจากเนื้อวัสดุไปในที่สุด

ในความเป็นจริง วัสดุไม่ได้เกิดการเสียหายเพียงเพราะการสัมผัสกันเท่านั้น แต่จะเกิดแบบผสมกัน เช่น ใบมีดที่ใช้สำหรับ ตัด หรือเจาะ เมื่อใช้ไปนานๆ ย่อมเกิดความร้อนเกิดขึ้น ณ บริเวณผิวสัมผัส ดังนั้นทั้งแรงกระทำทางกลและความร้อนจะเป็นตัวแปรสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดความเสียหาย ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเสื่อมประลัยของวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรต่างๆแล้วทำให้จำแนกรายละเอียดการสึกหรอได้ละเอียดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.2



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



รูปที่ 2.2 ประเภทของการสึกหรอ (Bahadur, S., 1996)

2.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition)

การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางฟิสิกส์เป็นกระบวนการสร้างอะตอมของสารเคลือบให้อยู่ในรูปของไอระเหยแล้วไปเคลือบอยู่บนผิวชิ้นงาน (Substrate) ในระบบที่เป็นสุญญากาศ ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์สามารถแบ่งได้ 4 ประเภทหลัก คือ

2.2.1 Cathodic arc deposition เป็นวิธีที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง ใช้แรงดันไฟฟ้าในการอาร์กให้เป็นไอต่ำ เป้าแคโทดจะถูก Ionized ให้กลายเป็นไอและวัสดุชิ้นงานจะถูกทำให้เอียงเพื่อให้เกิดการเร่งไอออน

2.2.2 Ion plating เป็นการการพุ่งเข้าชน (Bombardment) ด้วยอะตอมที่มีขนาดเล็กทำอนุภาค ที่มีพลังงานในการเปลี่ยนแปลงและควบคุมคุณสมบัติของชั้นฟิล์มที่สะสม ซึ่งกระบวนการนี้พลังงาน ฟลักซ์และมวลที่ระดมยิงพร้อมกับอัตราการยิง จะมีความสำคัญ ในกระบวนการ Ion plating สามารถทำได้ในสถานะเวกคัลล์พลาสมาหรือในสถานะสุญญากาศ ฟิล์มที่ได้จะมีความแน่นยึดเกาะได้ดี

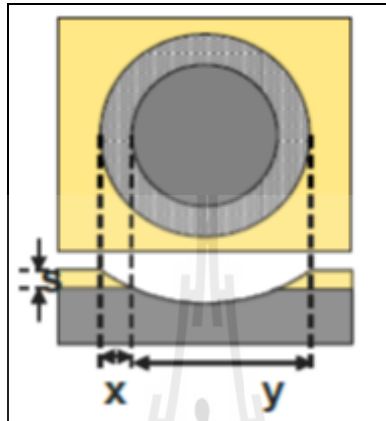
2.2.3 Sputtering เป็น PVD Coating Process ที่อะตอมของวัสดุเคลือบถูกขับออกมาโดยไอของอะตอมที่มีพลังงานสูงดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยขั้นแรกภายในห้องเคลือบ (Chamber) จะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นจะปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar Gas) เข้าไป และวัสดุสำหรับเคลือบ (ในที่นี้ขอเรียกว่า Target วัสดุประกอบ) จะถูกทำให้เป็นขั้วลบ (Cathode) โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Potential) ระหว่าง -500 ถึง -5000 โวลต์ ก็จะทำให้เกิด Low-Pressure Glow Discharge Plasma ณ บริเวณรอบ ๆ วัสดุสำหรับเคลือบ (Target Cathode) แล้วปล่อยประจุบวกของก๊าซอาร์กอน (Ar^+) ออกมา ซึ่ง Ar^+ จะถ่ายเทโมเมนตัมให้กับวัสดุสำหรับเคลือบ กระตุ้นให้วัสดุสำหรับเคลือบปลดปล่อยอะตอมออกมาแล้วอะตอมนั้นก็เคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate) และบริเวณภายในของห้องเคลือบ

2.2.4 Evaporating กระทำโดยการนำเอาวัสดุต้นกำเนิดของชั้นเคลือบ ไปให้ความร้อนในสถานะที่เป็นสุญญากาศ (10^{-6} kPa or 7.5×10^{-6} torr) ทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอภายในท่อระบบสุญญากาศแล้วเคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate) อย่างไรก็ตามกรรมวิธีที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าคือ Sputtering หรือ Ion plating (Mattox., D. M., 1998)

โดยในงานวิจัยนี้เลือกวิธีการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ประเภท Cathodic arc deposition โดยมีบริษัท นาโนซิลด์ จำกัด (ผู้ร่วมวิจัย) เป็นผู้เคลือบให้

2.3 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest

การวัดหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest คือ วิธีการวัดตามมาตรฐาน ISO EN 1071 เป็นวิธีที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ โดยหลักการทำงานของ Calotest จะใช้หัวบอลทรงกลมหมุนเจาะให้เกิดรอยหลุมไม่เกินครึ่งลูกบอลทรงกลม ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การหาความหนาของชั้นเคลือบด้วยวิธี Calotest

จากนั้นจึงตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อวัดหาค่าตัวแปร X และ Y แล้วจึงนำมาเข้าสู่สมการดังนี้

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

โดยที่

S คือ ความหนาของชั้นเคลือบ

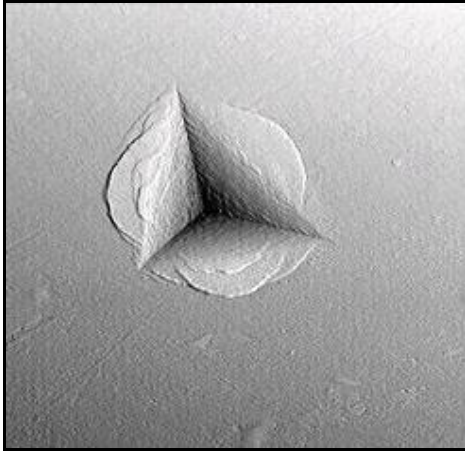
ϕ คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล

เพื่อหาค่าความหนาของชั้นเคลือบดังรูปที่ 2.3 (CSM instrument, www, 2012)

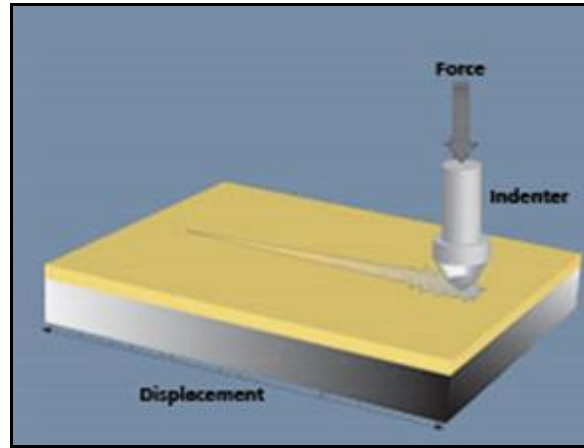
2.4 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอที่นิยมกระทำมี 2 ประเภท คือ

2.4.1 การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งงานทดสอบมีขนาดเล็ก ขนาดของแรงที่ใช้ทดสอบเป็นค่าสมมติขึ้น โดยพยายามทำให้ใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบัติพื้นฐาน เช่น ความแข็ง (Hardness) อัตราการสึกหรอ (Wear rate) เป็นต้น การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการที่นิยมแสดงดังรูปที่ 2.4



(ก) ลักษณะการทดสอบ Nanoindentation



(ข) ลักษณะการทดสอบ Scratch test

รูปที่ 2.4 การทดสอบความแข็งระดับนาโน และการทดสอบการสึกหรอ (Wikipedia, www, 2012; CSM instrument, www, 2012)

การทดสอบการสึกหรอในระดับห้องปฏิบัติการ (เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก) ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์นิยมตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Scratch tester และ Nano indentation เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความต้านทานการขีดขีดและความแข็งของชั้นเคลือบดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีหลักการดังนี้

- Scratch tester

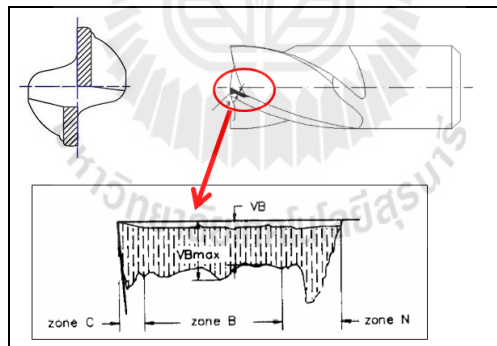
เป็นการทดสอบวัดความสามารถในการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุพื้น ด้วย การวัดค่าแรงกระทำวิกฤต โดยส่วนมากนิยมวัด ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (First crack initiation, Lc1) และค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกสมบูรณ์ (Full delamination, Lc2) ซึ่งค่าสุดท้ายนี้ทางอุตสาหกรรมถือว่ามีความสำคัญสูงสุด เพราะบ่งชี้ถึงความเสียหายโดยสมบูรณ์ของชั้นเคลือบ

- Nano indentation

เป็นการหาทดสอบค่าความแข็งระดับนาโน (H_{IT}) โดยพิจารณาจากสมการคือ $H_{IT} = P_{max}/A_p$ ซึ่งวิเคราะห์จากแรงที่กระทำสูงสุด (P_{max}) และพื้นที่สัมผัสที่สนใจ (A_p) โดยการทดสอบวัดความแข็งระดับนาโน จะใช้หัวกดทำจากเพชร กดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยเพิ่มแรงกดบนผิว โดยผู้ใช้สามารถปรับขนาดแรงกดและความลึกในการทดสอบตามความเหมาะสมได้ (สุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์., 2008; Wikipedia, www, 2012; ปนัดดา นิรนาทลำพองศ., 2547)

2.4.2 การทดสอบในระดับปฏิบัติใช้งานจริง มีจุดประสงค์เพื่อใช้เลือกวัสดุและสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพ ณ การใช้งานที่สนใจ แล้วนำไปใช้ภาคสนามจริงในสภาวะการทดสอบที่กำหนดโดยมีความเที่ยงตรงและสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility) ในระดับที่ยอมรับได้

สำหรับการทดสอบใช้งานจริงในงานวิจัยนี้ได้เลือกทดสอบโดยการกัดด้วยเครื่อง CNC โดยทำการศึกษาค่าการสึกหรอของดอกกัด (End mill) จากคมตัดที่สึกหรอ (Flank wear) ซึ่งเป็นบริเวณที่วัดค่าการสึกหรอได้ง่าย ดังในรูปที่ 2.5 โดยหลังจากการกัดผิวไปแล้วแต่ละรอบจะทำการวัดค่าการสึกหรอจากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนไปด้วยค่าเฉลี่ย V_{Bmax} สำหรับงานวิจัยครั้งนี้วิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3685 โดยที่อายุการใช้งาน (Tool life criterion) ของดอกกัดตามมาตรฐาน ISO 3002/1 อยู่ที่ไม่เกิน 200 ไมครอน ($V_{Bmax} \leq 200 \mu m$) ดังรูปที่ 2.5

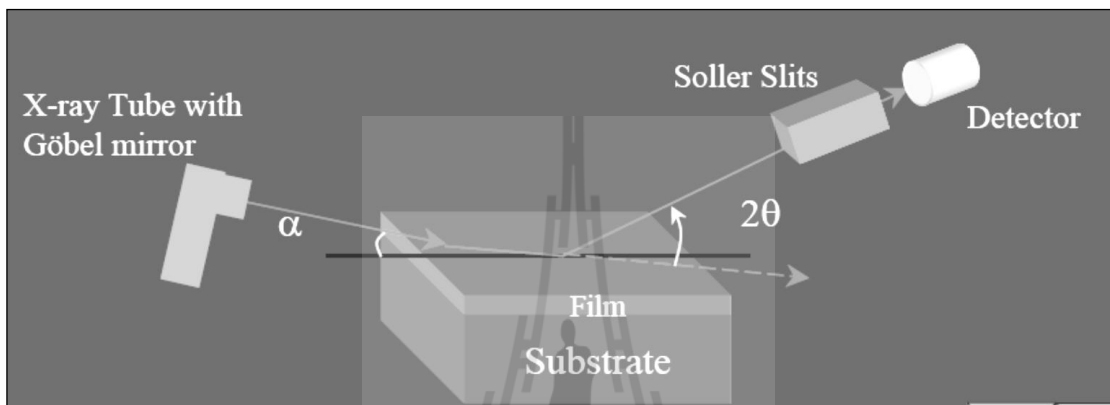


รูปที่ 2.5 วิธีการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Flankwear) ตามมาตรฐาน ISO 3685 (Santhanam, A.T., Tierney, P., 1998)

2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบของสารประกอบ

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

หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการเดียวกันกับการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทั่วไปแต่ในการวิเคราะห์ชั้นเคลือบสารประกอบชนิดฟิล์มบาง (Thin film) จะมีหลักการแตกต่างเล็กน้อยคือ การทำให้ดัชนีหักเห (Refractive Index) ที่ได้จะน้อยกว่าเอกภาพ (Unity) โดยมีการกำหนดให้มุม incidence (α) ของรังสีเอกซ์ที่จะตกกระทบมีมุมแคบลงหรือเป็นการทำให้มุมตกกระทบเกิดการเฉียงนั่นเอง ซึ่งการสะท้อนรังสีที่ยังตกกระทบจากด้านนอกทั้งหมดจะเกิดต่ำกว่ามุมวิกฤต (α_c) (Spring-8, www, 2012.) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบ Glancing angle (Spring-8, www, 2012)

2.5.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับตรวจสอบการสึกหรอที่ผิว เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 – 30,000 เท่า และสามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบในแนวลึกได้กว่า 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ปกติ ทำให้วิเคราะห์ผิวในรายละเอียดได้ ชั้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ด้วย SEM จะมีขนาดเล็ก เช่น บางกว่า 20 มิลลิเมตร (≤ 0.8 นิ้ว) และความสูงไม่เกิน 80 มิลลิเมตร (≤ 3.5 นิ้ว) และต้องทำความสะอาดด้วยสารละลายอย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากชั้นทดสอบต้องอยู่ในสถานะสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า 1.3 มิลลิพาสคาล (mPa) (10^{-5} บาร์) และหากชั้นทดสอบไม่นำไฟฟ้าก็ต้องเคลือบด้วยคาร์บอนหรือทองคำเพื่อให้อิเล็กตรอนไปสะสมตัวบนผิวชิ้นงานได้

2.5.3 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

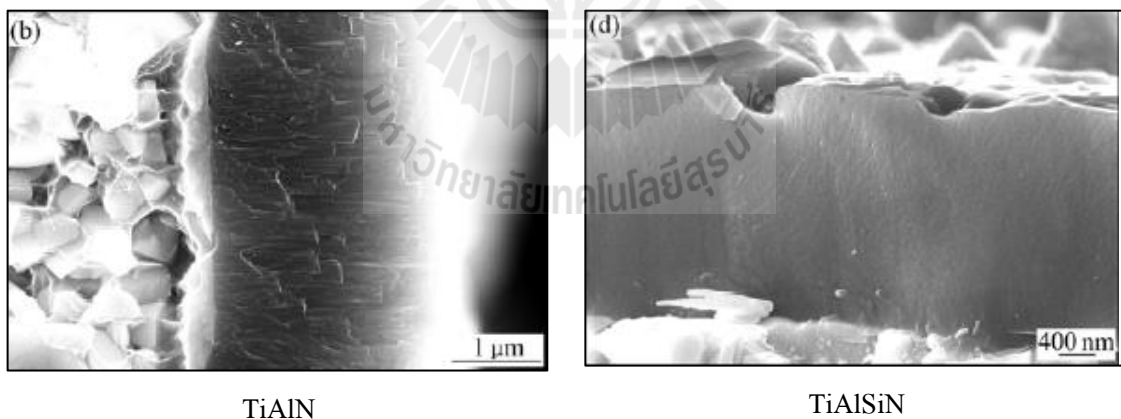
เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับ SEM โดยหลังจากการที่พื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอน เกิดการ excite อิเล็กตรอนชั้นใน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นเกิดเป็นช่องว่าง โดยอิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีพลังงานสูงกว่าจะมาเติมเต็มอิเล็กตรอนที่หายไปและเมื่อเกิด

การ excite ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูป Characteristic X-ray จากนั้นจึงนำมาประมวลผล ซึ่งในงานวิจัยใช้เทคนิค EDS สำหรับวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด (แม้นอมรสิทธิ์.,2535; Toya, T., Jotaki,R., Kato,A.,1986)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลวารสารทางวิชาการที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งวารสารเหล่านี้จะช่วยทำให้ข้อมูลในรายงานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์และสามารถทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยครั้งนี้ได้อย่างถูกต้อง โดยเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย งานวิจัยทางด้านการศึกษาหรือและการเกิดออกซิเดชันซึ่งอธิบายรายละเอียดดังนี้

Stan, V. et al. (2005) ศึกษาซิลิกอนไนไตรด์ (amorphous Si_3N_4) มีผลทำให้เกรนของชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์มีความละเอียดขึ้น Yu, D. et al. (2009) และ Wang, S.Q. et al (2011) ได้ศึกษาโดยการเติมซิลิกอนลงในชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) กลายเป็นชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) พบว่าค่าความแข็งของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น โดยอธิบายว่าค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกรนละเอียดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงถูกยับยั้ง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ TiAlN และ TiAlSiN (Wang, S.Q., 2011)

Nurot, P. et al. (2012) ได้พัฒนาชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlCrTiN) ด้วยการเติมธาตุซิลิกอนทำให้ชั้นเคลือบจึงเปลี่ยนเป็นอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียม

ซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีความสามารถยึดเกาะกับวัสดุพื้นได้ดี และมีความแข็งของชั้นเคลือบสูงมากถึง 50 GPa

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

Mo, J.L., Zhu, M.H. (2009) ได้ศึกษาผลของออกไซด์ของธาตุไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ที่เกิดขึ้นให้ผลที่แตกต่างกันในด้านการสึกหรอ สำหรับออกไซด์ฟิล์มของ อะลูมิเนียมและโครเมียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการกระทบ ร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการเพิ่มการสึกหรอและความเสียหาย

Shane, Y. H., Yucheng, D. (2001) ได้ศึกษาอุณหภูมิในการตัด (Cutting temperature) พบว่า อุณหภูมิในการตัดจะสูงถึง 920 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความเร็ว (Cutting speed) จนถึง 2.5 เมตรต่อวินาทีในการตัด ถึงแม้จะใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดก็ตาม โดยงานวิจัยในครั้งนี้ใช้ความเร็ว ในการตัด 2.9 เมตรต่อวินาที

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่กล่าวมา ทดสอบในภาคการใช้งานจริง หรือทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น โดยขาดการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างผลของห้องปฏิบัติการและภาคการใช้งานจริงว่ามีข้อเหมือน ข้อแตกต่าง อนึ่งวิธีการทดสอบการสึกหรอมีหลายระดับให้เลือกตามความเหมาะสม และสภาพการณ์ใช้งานจริงของชิ้นส่วนนั้นๆ ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนมีความเห็นว่าการทดสอบทั้งสองระดับควรจัดให้มีขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ แล้วนำผลที่ได้มาประมวล เพื่อใช้ประโยชน์และเป็นแนวทางการเลือกวัสดุให้เหมาะสมต่อไปในอนาคต

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1.1 วัสดุที่ถูกเคลือบผิวหรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อการทดสอบมี ดังนี้

3.1.1.1.1 ดอกกัด (End mill) ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เกรด K10 ใช้สำหรับทดสอบในภาคการใช้งานจริง

3.1.1.1.2 แผ่นวัสดุ ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เกรด K10 ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการใช้เพื่อวัดค่าความแข็งระดับนาโน และทดสอบการขูดขีด (Scratch test)

3.1.1.1.3 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 304 ใช้เพื่อวัดค่าความหนาของชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์

3.1.1.2 วัสดุที่ถูกใช้สำหรับกัดผิวเพื่อใช้ทดสอบการสึกหรอในสภาวะการใช้งานจริงได้เลือกเป็น เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

(โดยได้รับความอนุเคราะห์เครื่องตรวจสอบจากบริษัท 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.

3.1.2 วัสดุ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2
- ดอกกัด (End mill) ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เกรด K10
- ลวดไวคัต สำหรับตัด ชิ้นงาน
- เอทานอล
- กรดไนตริก (HNO_3)
- เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะการทดลองซึ่งได้อธิบายลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์อย่างละเอียดดังนี้

ก) อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ

- เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ METKON FORCIPOL 2V GRINDER POLISHER ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน

- เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงรุ่น WYKO NT1100 ยี่ห้อ VEEGO INSTRUMENT INC. ใช้วัดความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความหยาบพื้นผิวแบบใช้แสง

- เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกรุ่น CREST 6659 ใช้ในการล้างชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบกัดผิวแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องอุลตราโซนิก

- กระดาษทรายเบอร์ 100, 180, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 แสดงดังรูป

3.4



รูปที่ 3.4 กระดาษทรายที่ใช้ในการวิจัย

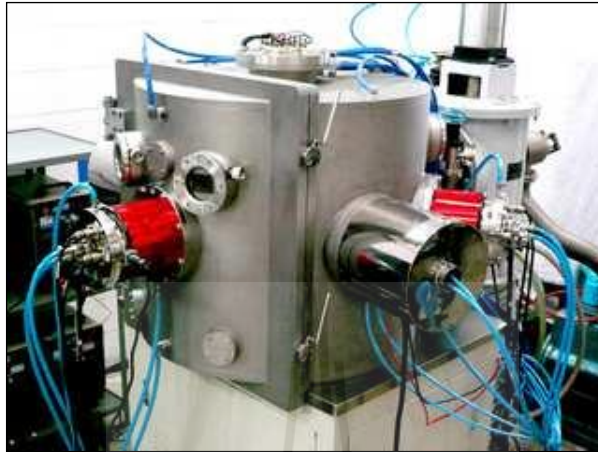
- ข) อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานสำหรับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง
- เตอบชิ้นงานแบบดั้งเดิม รุ่น CARBOLITE TYPE CWF 12/13 ใช้ในการอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เตอบชิ้นงานแบบดั้งเดิม

- ค) อุปกรณ์สำหรับการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์

- เครื่องเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์ แบบ Cathodic arc deposition ใช้ในการเคลือบผิวโลหะทางฟิสิกส์ให้กับชิ้นงาน สำหรับเครื่องนี้ตั้งอยู่ที่บริษัท นาโนซิลล์ จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยบริษัทเป็นผู้เคลือบให้



รูปที่ 3.6 เครื่องเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์

ง) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสึกหรอ

- ในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงได้เลือกใช้เครื่อง Computer Numerical Control หรือเครื่องกัดซีเอ็นซี เป็นเครื่อง แบบ 3 แกน โดยมีการอ้างอิงระบบแกนในแบบ คาร์ทีเซียน 3 มิติ ใช้ในการทดสอบกัดผิวให้ใบมีดเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียว แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องกัดซีเอ็นซีชื่อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16

- ในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการได้เลือกใช้เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดและเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวในการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการสึกหรอและวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไอทาง

ฟิลิกส์ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท CSM instrument ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ เป็นผู้ทดสอบให้ แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindenter)



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด (Scratch tester)

จ) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน

- เตาอบแบบท่ออนอน (Tube furnace) รุ่น GHA 12/600/3216P1 ใช้สำหรับการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เตาอบแบบท่ออนอน (Tube furnace)

ฉ) อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ส่วนผสมทางเคมี และวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน

- เครื่องทดสอบหาความหนาของชั้นเคลือบ Calotest ของ CSM instrument สำหรับวัดค่าเพื่อคำนวณความหนา เป็นเครื่องที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเคลือบผิวเพื่อวัดหาความหนาอย่างง่าย โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท CSM instrument ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ เป็นผู้ทดสอบให้แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่อง Calotest

- กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope, SM) รุ่น HZ 4D ยี่ห้อ LEICA หลังผ่านการทดสอบในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง จะทำการศึกษาลักษณะการสึกหรอและวัดค่าการสึกหรอของชิ้นงานดอกกัดด้วยกล้องแบบสเตอริโอ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงรุ่น ZEISS AX10 พร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image analysis) ใช้ในการตรวจโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนและหลังการอบชุบ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) รุ่น JSM-5410 ยี่ห้อ JEOL ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและรอยการสึกหรอของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์- โคบอลต์ เกรด K10 ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริงโดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า และมีการใช้ EDS ร่วมในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี โดยใช้บริการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ความเสียหายและการกัดกร่อนของวัสดุ ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติปทุมธานี ฯลฯ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกวาด

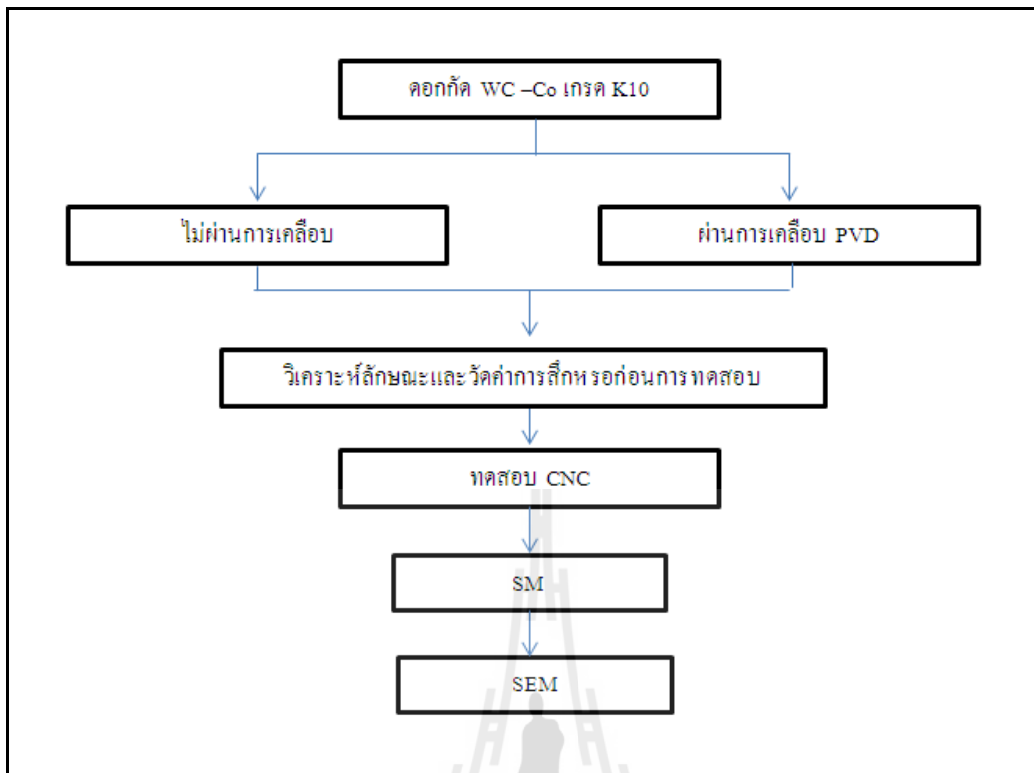
- X-ray Diffraction รุ่น D8 ซีรีส์ Bruker ใช้ในการวิเคราะห์ชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์และออกไซด์ของชิ้นงานจากการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน แสดงดังรูป 3.15



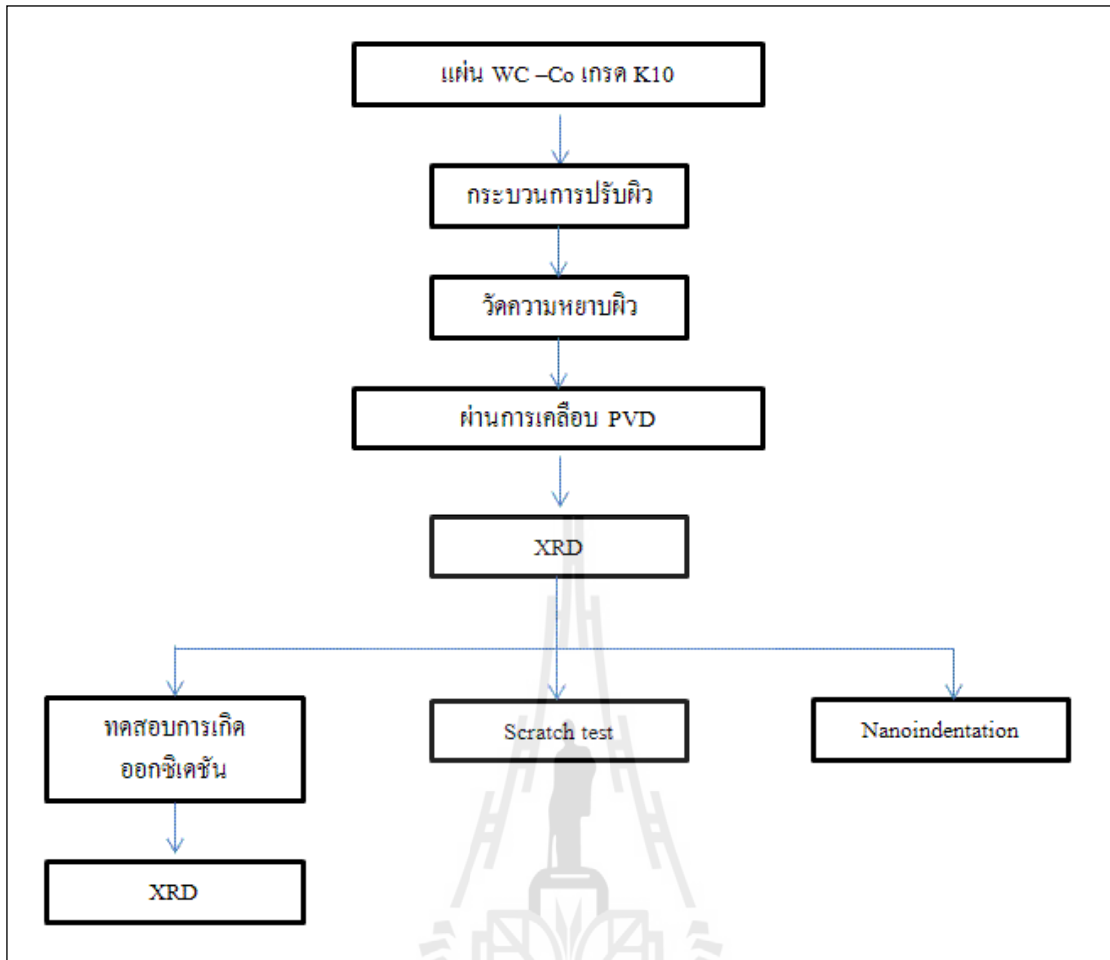
รูปที่ 3.15 เครื่อง X-ray Diffraction

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

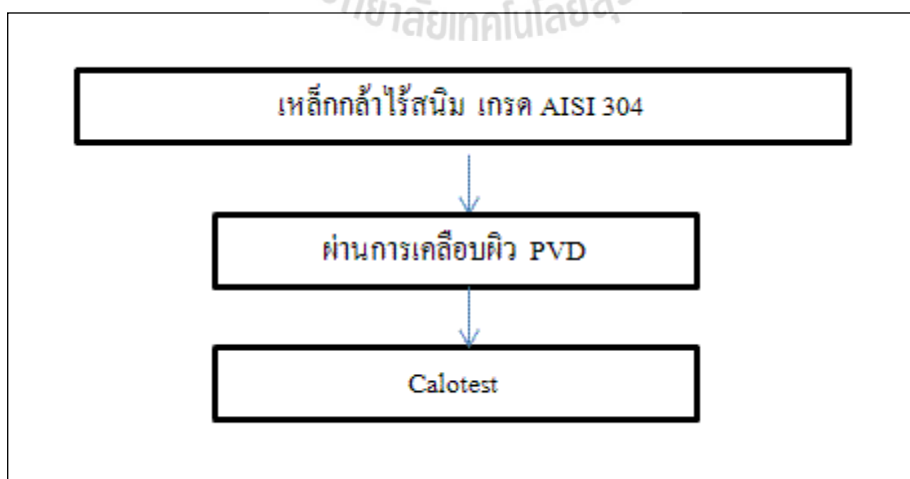
ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำวิจัยตามแผนภาพระเบียบวิธีการทำงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18 ซึ่งมีการอธิบายอย่างละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.16 การดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง



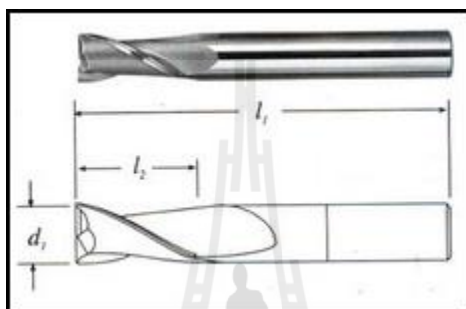
รูปที่ 3.17 การดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.18 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 3.19 คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) ประมาณ 8 มิลลิเมตร ความยาวของใบมีด (l_2) ประมาณ 25 มิลลิเมตรและความยาวของดอกกัดทั้งหมด (l_1) 80 มิลลิเมตร ล้างทำความสะอาดผิวดอกกัดด้วยเอทานอลก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ ทำการวิเคราะห์และวัดค่าการสึกหรอเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope, SM) ที่กำลังขยาย 350 เท่า



รูปที่ 3.19 ลักษณะของดอกกัด (End mill)

(Craftsman CNC, www, 2013)

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

3.2.1.3 นำชิ้นงานข้อ 3.2.1.1 และ 3.2.1.2 หลังจากเสร็จสิ้นการล้างทำความสะอาดผิวและทำการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนเคลือบแล้ว ให้นำชิ้นงานไปเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ ประเภท Cathodic arc deposition โดยมีชั้นเคลือบดังนี้ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) โดยบริษัท นาโนชีลด์ จำกัด (ผู้ร่วมวิจัย) เป็นผู้เคลือบให้

3.2.1.4 เตรียมวัสดุสำหรับถูกกัดผิวเพื่อใช้ทดสอบการสึกหรอในสภาวะการใช้งานจริงคือ เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 โดยอบชุบด้วยเตาอบแบบดั้งเดิมโดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1050 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที แล้วจึงนำออกมาเย็นตัวในอากาศ จากนั้นเมื่อชิ้นงานเย็นตัว จึงอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที และอบคืนไฟ 2 รอบ จากนั้นนำชิ้นงานไปตัดทดสอบความแข็งและนำไปทดสอบถูกกัดผิว

3.2.2 การหาค่าความหนาของชั้นเคลือบ

ในส่วนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบด้วยไอทางฟิสิกส์จะนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Calotest เพื่อหาความหนาของชั้นเคลือบ โดยจะใช้ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ใช้หัวบอลทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรในการหมุนหมุนลงบนผิวชั้นเคลือบ ซึ่งตำแหน่งของรอยกดทรงกลมจะสัมพันธ์ต่อชิ้นงานและแรงกดที่มีค่าคงที่โดยจะกดลงไปให้เกิดรอยหลุมไม่เกินครึ่งลูกบอลทรงกลม ในระหว่างที่ลูกบอลหมุนต้องคอยหยุดสารละลาย (น้ำผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์) ต่อเนื่อง แล้วจึงทำการวัดด้วยเลนส์สเกลสายตา โดยทำการวัดและคำนวณดังรูปที่ 2.3 และค่าความหนาของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิดที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

(ถูกทดสอบโดยบริษัท นาโนซิลล์ จำกัด)

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	0.10	0.40	0.20

3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง

3.2.3.1 นำดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์โดยมีชั้นเคลือบดังนี้ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (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) 2.90 เมตรต่อวินาที
- รัศมีความลึกของการตัด (Radialdepthofcut) 0.02 มิลลิเมตร

- ความลึกในการตัด (Depthofcut) 2.00 มิลลิเมตร
- ความยาวในการตัด (Cuttinglength) ในแต่ละครั้งที่ทำการวัดประมาณ 500 มิลลิเมตร
- ชนิดของสารหล่อเย็น คือ น้ำมัน

ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการวัดค่าการสึกหรอทุกครั้งจากระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบรอบละ 500 มิลลิเมตร โดยวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่มีค่ามากที่สุด (Maximum flank wear) จากขนาดของคมตัดที่เปลี่ยนแปลง โดยวิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3685 โดยอายุการใช้งาน (Tool life criterion) ของดอกกัดตามมาตรฐาน ISO 3002/1 ไม่เกิน 200 ไมครอน ($V_{Bmax} \leq 200 \mu m$) (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 เปรียบเทียบชนิดของชั้นเคลือบที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัด (End mill) ที่ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์

3.2.4 ขั้นตอนการดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.4.1 นำแผ่นคาร์ไบด์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไอทางฟิสิกส์ ไปวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยเครื่อง XRD รุ่น D8 ยี่ห้อ Bruker ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของพลังงาน (Intensity) และมุมการเลี้ยวเบน (2θ) ของธาตุหรือสารประกอบจะมีมุมการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน การวิจัยครั้งนี้ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานจาก Cu K α

3.2.4.2 นำแผ่นคาร์ไบด์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไอทางฟิสิกส์ ทดสอบด้วย Scratch tester machine เพื่อวิเคราะห์หาแรงกระทำวิกฤติที่ทำให้ชั้นเคลือบเกิดรอยแตกครั้งแรก และแรงกระทำวิกฤติที่ทำให้ชั้นเคลือบหลุดลอก โดยสมบูรณ์ โดยกำหนดแรงทดสอบเริ่มต้นมีค่า 0.9 นิวตัน แล้วเพิ่มแรงกระทำไปเรื่อยๆจนถึงแรงกระทำสุดท้าย คือ 150 นิวตัน ความเร็วของหัวกดที่ใช้คือ 4 มิลลิเมตรต่อนาที และความยาวในการลากหัวกด 2 มิลลิเมตร และทำการทดสอบ Nano indentation test โดยใช้หัวกดวัดความแข็งแบบ Berkovich (โดยการทดสอบ Scratch Test และ Nano indentation test บริษัท CSM instrument ณ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ให้ความอนุเคราะห์)

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

3.2.5 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอของคมตัด

ภายหลังการทดสอบการสึกหรอในระดับปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง จะนำชิ้นงานที่เกินช่วงอายุการใช้งานมาตัดเอาบริเวณหัวกัดไปวิเคราะห์รอยการสึกหรอของคมตัด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาพื้นผิวการสึกหรอ โดยใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่า เพื่อให้มองเห็นภาพได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบ EDS เพื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี



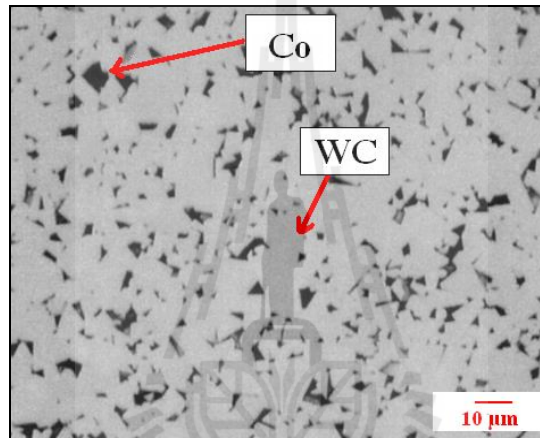
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบ

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เกรด K10

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน WC-Co เกรด K10 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าชิ้นงาน WC-Co เกรด K10 มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และโคบอลต์ (Co)

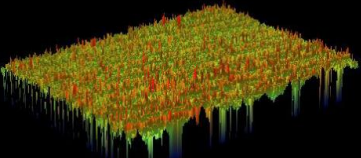
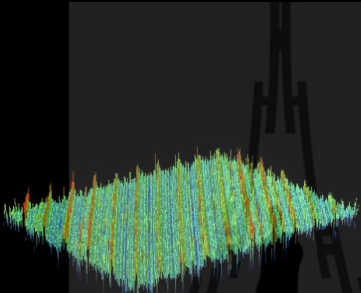
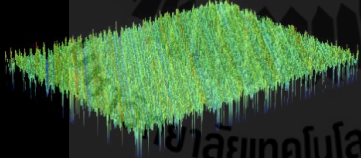
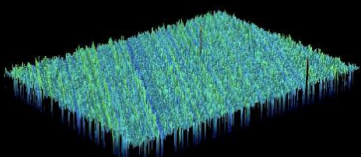


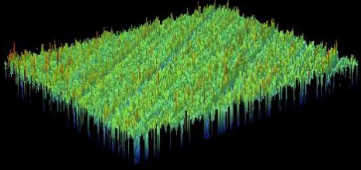
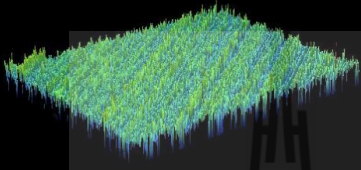
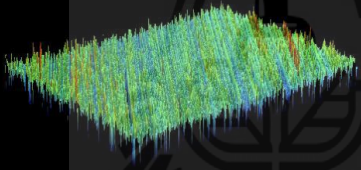
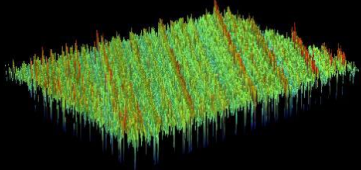
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของ WC-Co เกรด K10 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

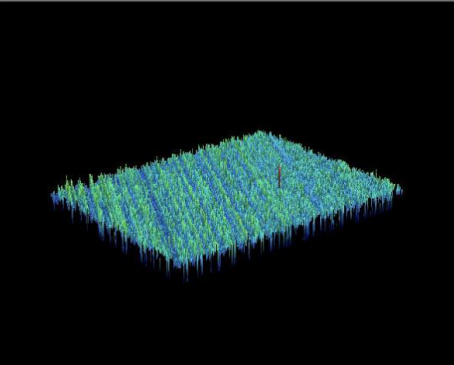
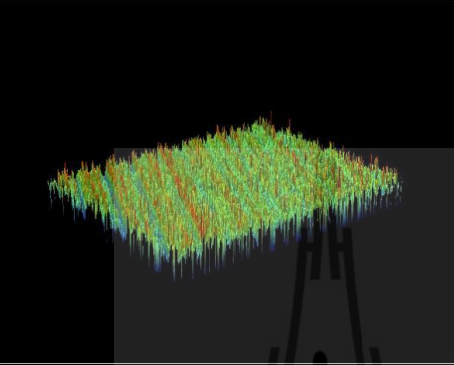
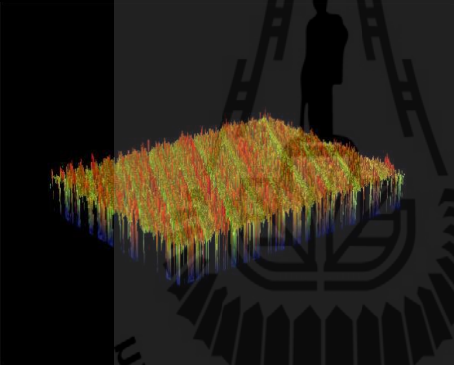
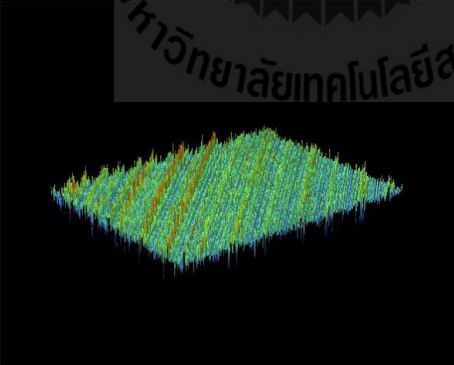
4.1.2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน WC-Co เกรด K10

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน WC-Co เกรด K10 ก่อนการเคลือบผิว

ตารางที่ 4.1 ค่าความหยาบเฉลี่ยของแผ่น WC-Co เกรด K10

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

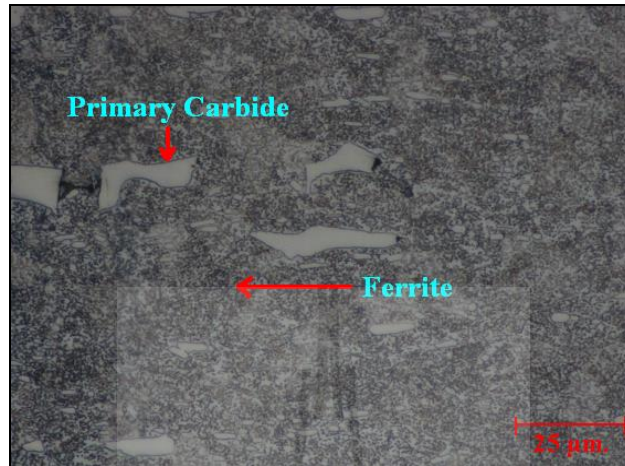
5				109.49
6				107.13
7				95.37
8				105.06

9			118.88
10			116.71
11			93.86
12			97.27

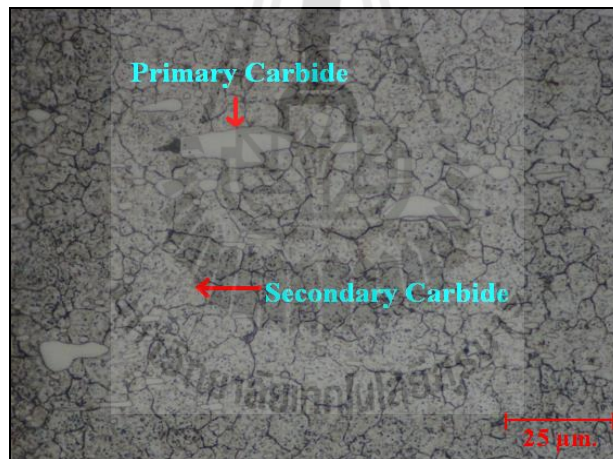
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนและหลังอบชุบทางความร้อน โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย 50 เท่า ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนอบชุบทางความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary carbide) ส่วนชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2 หลังการอบชุบทาง

ความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary carbide) คาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary carbide) และโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ภายหลังจากการอบชุบทางความร้อนจะส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนการอบชุบทางความร้อน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI D2 หลังการอบชุบทางความร้อน

4.1.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อนที่ทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวล (สเกลซี) พบว่าหลังอบชุบทางความร้อนเหล็กกล้า AISI D2 มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นจาก 30.0 HRC เป็น 59.0 HRC เนื่องจากหลังการอบชุบทางความร้อนโครงสร้างของเหล็กกล้า AISI D2 มีการเปลี่ยนแปลง เป็นมาร์เทนไซต์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูง จึงส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานหลังการอบชุบทางความร้อนมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น (Wolfhang Bleck., 2007)

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI D2 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน

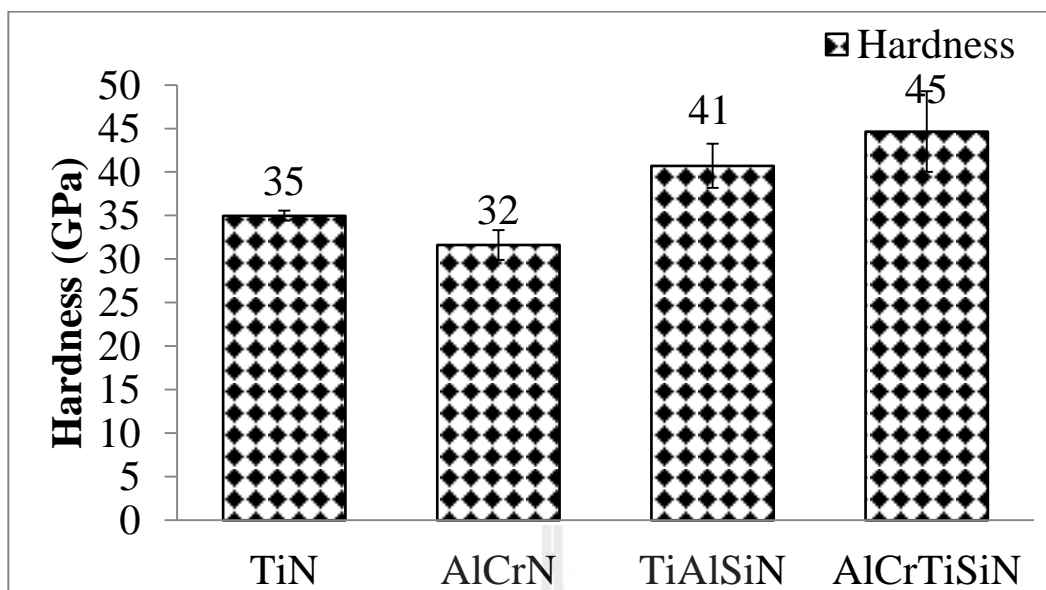
ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HRC)
เหล็กกล้า AISI D2 ก่อนการอบชุบทางความร้อน	20.0
เหล็กกล้า AISI D2 หลังการอบชุบทางความร้อน	59.0

4.2 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติระดับห้องปฏิบัติการ

4.2.1 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโนของชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์ คือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากการเติมธาตุซิลิกอนเข้าไปจะมีผลทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น เนื่องจากธาตุซิลิกอนจะถูกทำให้อยู่ในรูปของโครงสร้างพื้นซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยผลึกของ AlCrTiN ในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยาก จึงมีความแข็งแรงสูง (Stan, V., Maritza, 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) และชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่าความแข็งสูงกว่าชั้นเคลือบ TiAlSiN ที่มีการเติมธาตุซิลิกอนแบบเดียวกัน เนื่องจากการเติมธาตุซิลิกอน ชั้นเคลือบ AlCrTiN มีค่าความแข็งสูงกว่าชั้นเคลือบ TiAlN อยู่ก่อนแล้ว (M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim., 2008; Tomas, P., Albano C., 2011) ดังนั้นค่าความแข็งของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ TiAlSiN จึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ค่าความแข็งระดับนาโนของชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์ถูกวัดโดยใช้เครื่อง Indentation Testing Hardness (H_{IT}) โดยใช้หัตถกด (Indentor) ขนาดเล็กกดลงไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัด จากนั้นคำนวณหาความแข็งโดย นำค่าแรงกดสูงสุด (Maximum hardness) ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันหารด้วยพื้นที่ผิวรอยกด ซึ่งมีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ด้วยเหตุนี้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์จึงมีหน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN (ทดสอบโดยบริษัท CSM instrument)

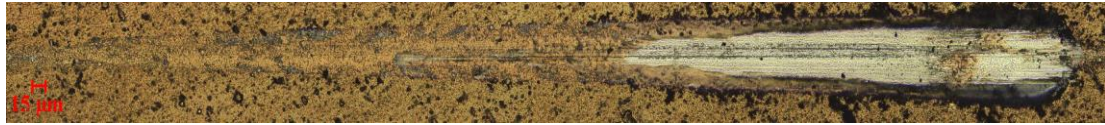
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด

ในการทดสอบการขูดขีด ปกติสามารถเพิ่มแรงกระทำได้สูงสุดถึง 200 นิวตัน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้แรงกระทำสูงสุด 150 นิวตัน เพื่อถนอมหัวกดให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะรอยขูดขีดของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด ซึ่งสามารถวัดค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแตกแรก (First crack initiation, Lc1) และค่าแรงกระทำวิกฤตเมื่อชั้นเคลือบเกิดการหลุดลอกโดยสมบูรณ์ (Full delamination, Lc2) ได้โดยเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบผลรอยขูดขีดของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิด พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่า Lc1 สูงที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้ ประมาณ 113.3 นิวตัน โดยที่ชั้นเคลือบ AlCrN มีค่า Lc1 ประมาณ 90.4 นิวตัน ดังจะเห็นได้ว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN เมื่อถูกหัวกดลากไปจนถึง 150 นิวตัน ยังไม่สามารถตรวจวัดค่า Lc2 ได้ แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ AlCrN มีความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุพื้นผิวมาก ส่วนชั้นเคลือบ TiN จะเกิดการหลุดลอกสมบูรณ์เร็วกว่าชั้นเคลือบ AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN อย่างชัดเจนเนื่องจากมีค่า Lc2 ต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 84.2 นิวตัน

อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชั้นเคลือบทั้ง 4 ชนิด ที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ AlCrN มีค่า

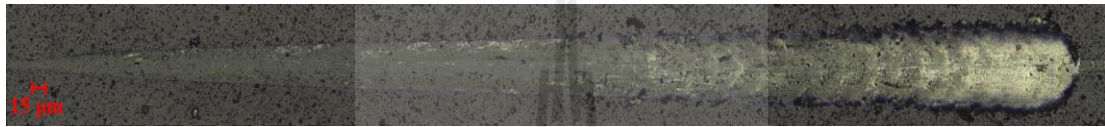
สัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้และมีแนวโน้มคงที่แม้จะเพิ่มแรงกระทำจนถึงแรงกระทำสุดท้าย



ก



ข



ค

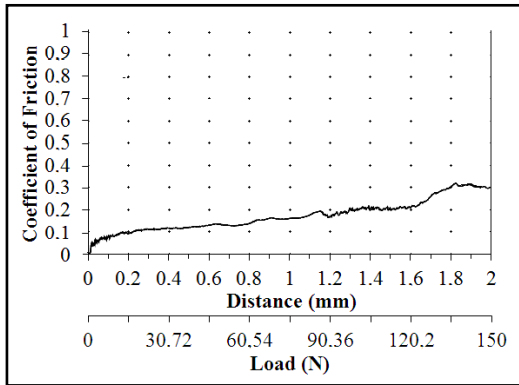


ง

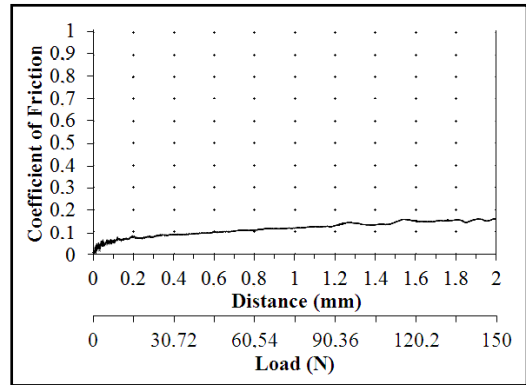
รูปที่ 4.5 ร่องรอยการขูดขีดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN

ตารางที่ 4.3 ค่า Lc1 และ Lc2 ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

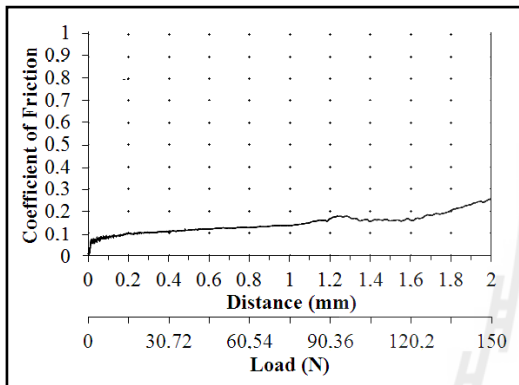
วัดครั้งที่	Lc1				Lc2			
	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN	TiN	AlCrN	TiAlSiN	AlCrTiSiN
1	52.84	92.83	36.63	119.64	87.51	-	129.81	-
2	57.54	87.40	25.43	113.71	88.90	-	125.39	-
3	47.22	91.02	22.00	106.48	76.06	-	121.59	-
mean	52.5	90.4	28.00	113.30	84.20	-	125.60	-
sd	5.20	2.80	7.60	6.60	7.00	-	4.10	-



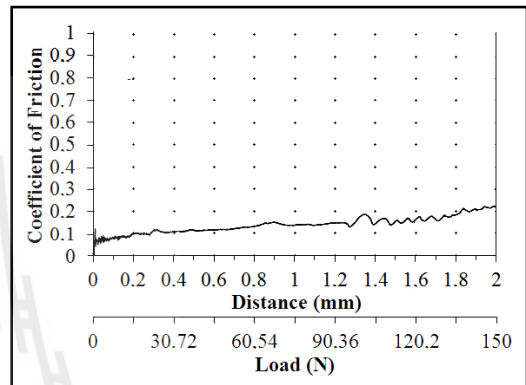
ก.)



ข.)



ค.)



ง.)

รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบ
ก) TiN ข) AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN

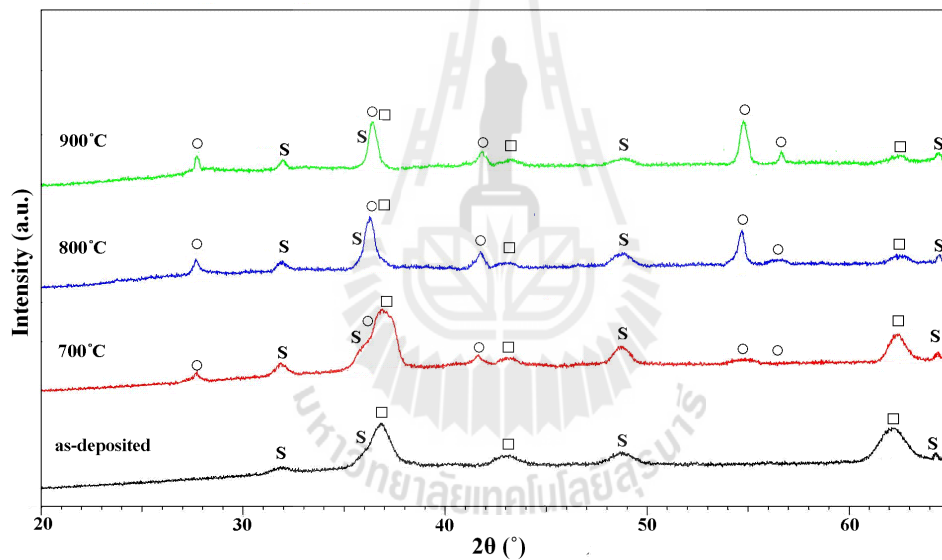
4.2.3 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เกรด K10 ที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบไอทางฟิสิกส์

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN หลังจากทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยจะพิจารณาออกไซด์ที่เกิดขึ้นของแต่ละชั้นเคลือบเป็นสำคัญ กล่าวคือ สารหล่อลื่นในรูปของแข็ง (Solid lubricant) มีคุณสมบัติช่วยต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเพราะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งโดยส่วนมาก Solid lubricant มักอยู่ในรูปออกไซด์ ดังนั้นการปรากฏออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นของแข็งได้ดี (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) เมื่อพิจารณารูป 4.7 พิกโทแกรมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส บนชั้นเคลือบ TiN สำหรับรูป 4.8. พิกโทแกรมของโครเมียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส บนชั้นเคลือบ AlCrN สำหรับรูป 4.9 พิกโทแกรมของออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

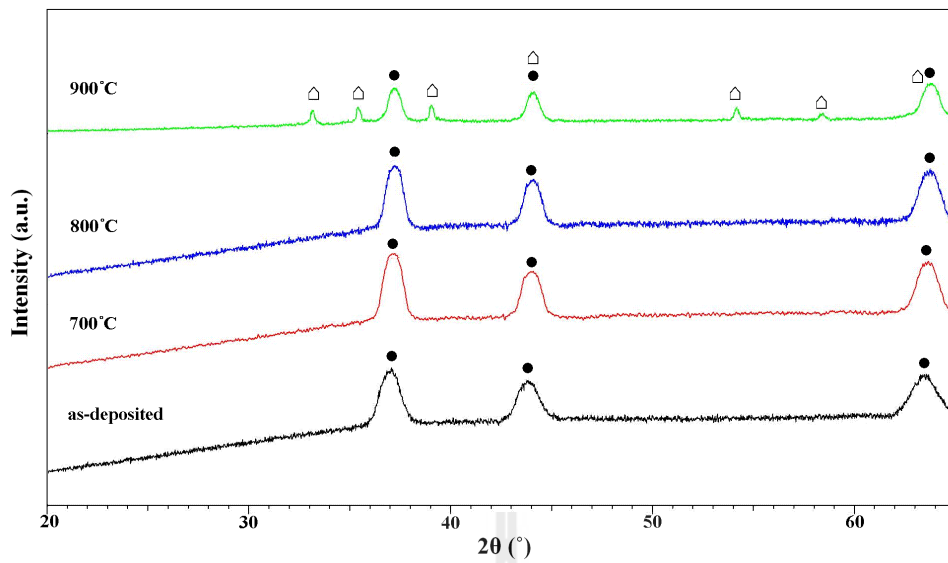
บนชั้นเคลือบ TiAlSiN และจะไม่ปรากฏพีคของซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้นซิลิกอนไนไตรด์ (M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park and C. Kim., 2008) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นผลึก และสำหรับรูป 4.10 พีคไทเทเนียมออกไซด์ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสบนชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และจะไม่ปรากฏพีคของซิลิกอนด้วยเหตุผลเดียวกับชั้นเคลือบ TiAlSiN เช่นกัน จะเห็นได้ว่าชั้นเคลือบแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการเกิดสารหล่อลื่นได้ที่อุณหภูมิต่างกัน เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง

หมายเหตุ

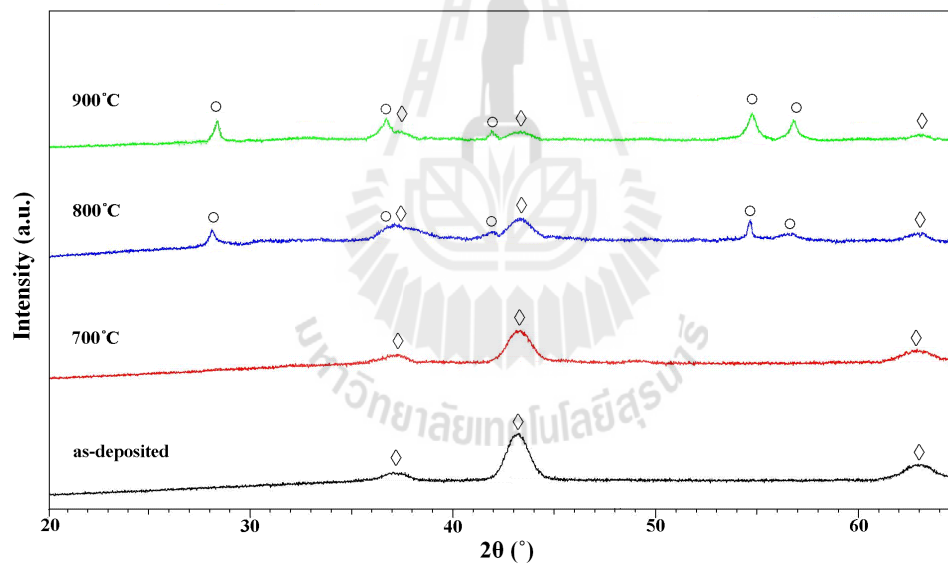
สัญลักษณ์ ●	คือ	พีคของ AlCrN	สัญลักษณ์ □	คือ	พีคของ TiN
สัญลักษณ์ ◇	คือ	พีคของ TiAlN	สัญลักษณ์ △	คือ	พีคของ AlCrTiN
สัญลักษณ์ ○	คือ	พีคของ TiO ₂	สัญลักษณ์ △	คือ	พีคของ Cr ₂ O ₃
สัญลักษณ์ S	คือ	พีคของวัสดุพื้น			



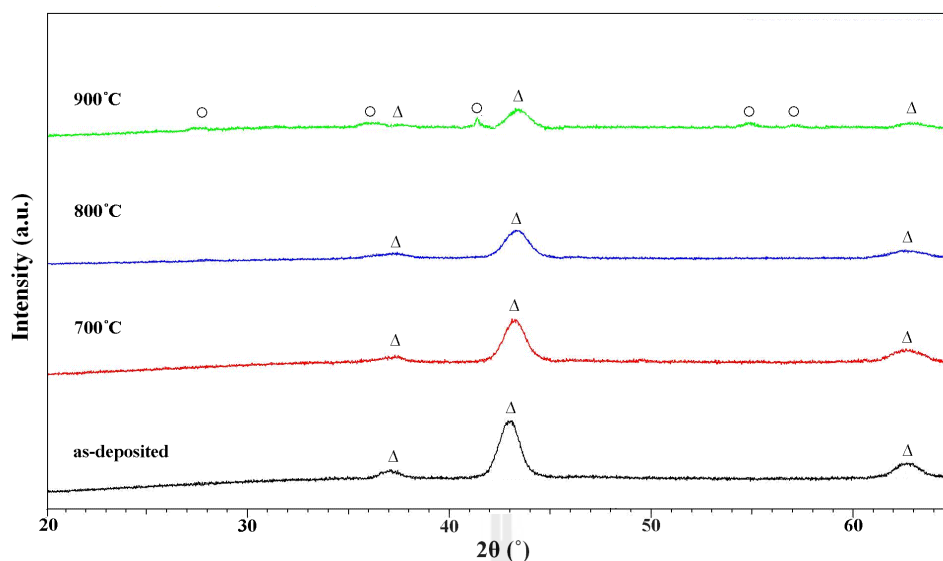
รูปที่ 4.7 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.8 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.9 XRD pattern ของชั้นเคลือบ TiAlSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ



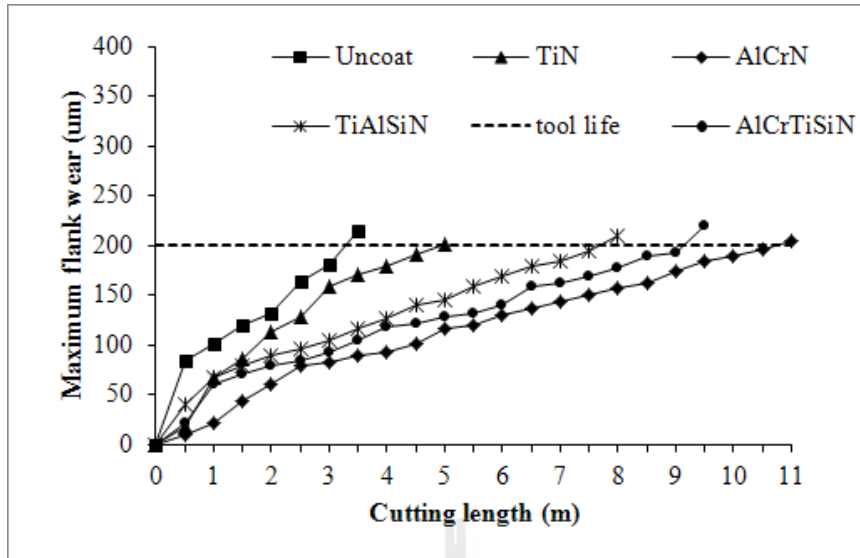
รูปที่ 4.10 XRD pattern ของชั้นเคลือบ AlCrTiSiN หลังทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ

4.3 ผลการทดสอบการสึกหรอในการปฏิบัติทดสอบใช้งานจริง

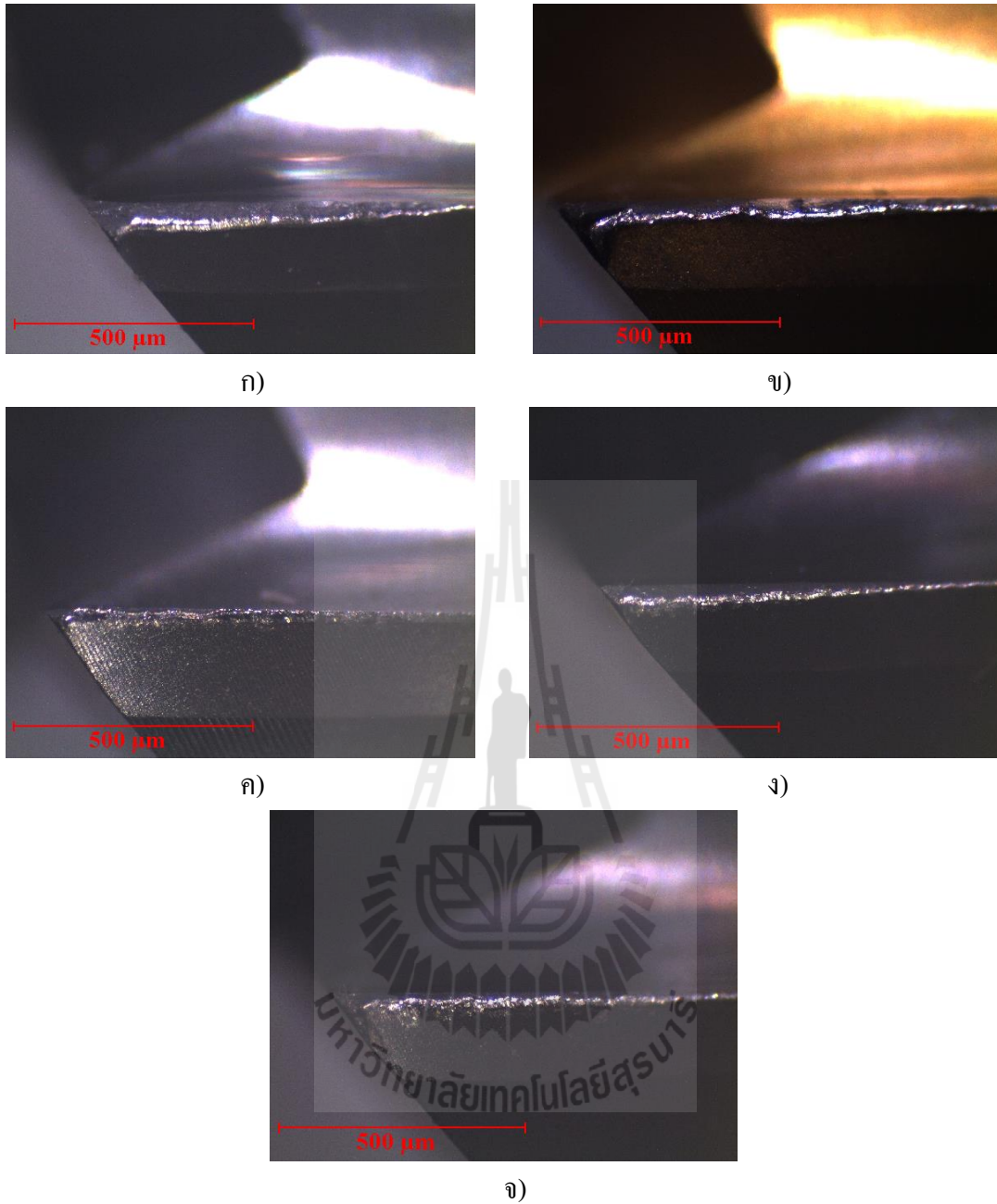
4.3.1 ผลการทดสอบการกัดผิวด้วยเครื่อง CNC

จากรูปที่ 4.11 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ของดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบโดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น พบว่า ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN, TiN และที่ไม่ผ่านการเคลือบมีอายุการใช้งานสูงสุด คือ 9.3, 7.7, 4.95 และ 3.2 เมตร ตามลำดับ ส่วนดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN จะมีอายุการใช้งานสูงสุดถึง 10.7 เมตร (โดยการทดสอบมีการทดสอบซ้ำ 1 รอบ ซึ่งมีผลแนวโน้มใกล้เคียงกันสามารถดูได้จากภาคผนวก จ)

เมื่อเปรียบเทียบความยาวการตัด 4 เมตร รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และไม่ผ่านการเคลือบ แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเยี่ยม (รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัดทั้งหมดสามารถดูได้จากภาคผนวก จ) โดยคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN, TiN และที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าการสึกหรอ 124.46, 128.9, 177.12 และ 216.79 ไมครอน ตามลำดับ แต่คมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrN มีค่าการสึกหรอ เพียง 95.81 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ AlCrTiSiN, TiAlSiN และ TiN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าชั้นเคลือบ AlCrN ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 4.6ก.ถึง 4.6ง.



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 2 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น



รูปที่ 4.12 รอยการสึกหรอบริเวณคมตัดของดอกกัด ก) ไม่เคลือบ ข) TiN ค) AlCrN ง) TiAlSiN และ
 จ) AlCrTiSiN หลังจากทดสอบกัดผิวเป็นระยะทาง 4 เมตร

4.3.2 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัด

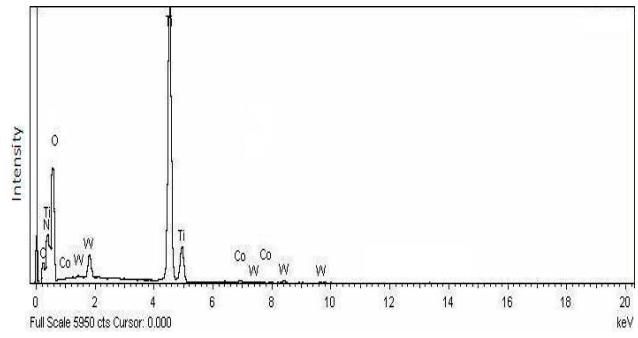
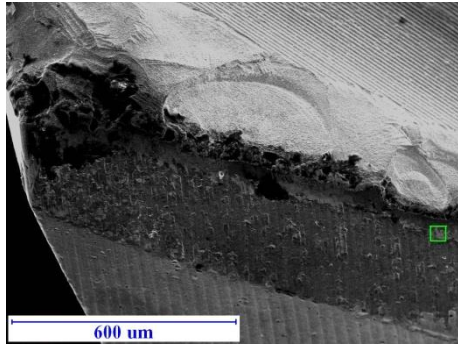
รูปที่ 4.13ก ถึง 4.13ง แสดงผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยการสึกหรอ บริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วยชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN หลังทดสอบกัดผิวจนเกินช่วงอายุการใช้งาน (Tool life) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยใช้เทคนิค EDS พบว่า บริเวณรอยการสึกหรอของคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบด้วย TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN แต่ละชั้นเคลือบแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบในแต่ละธาตุแตกต่างกันไปตามชนิดของแต่ละธาตุที่มีในชั้นเคลือบนั้น แต่มีธาตุชนิดหนึ่งที่ปรากฏเหมือนกันทั้งหมดคือธาตุออกซิเจน (O) ปรากฏขึ้นบริเวณรอยการสึกหรอคมตัด

ซึ่งชั้นเคลือบเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีออกซิเจนประกอบกับการมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากการได้รับแรงกระทำเป็นเวลานาน มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น (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) ออกซิเจนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีกับหลายๆ ธาตุ เช่น Ti, Cr และ Al เป็นต้น (Martin, N., Rousselot, C. 1998)

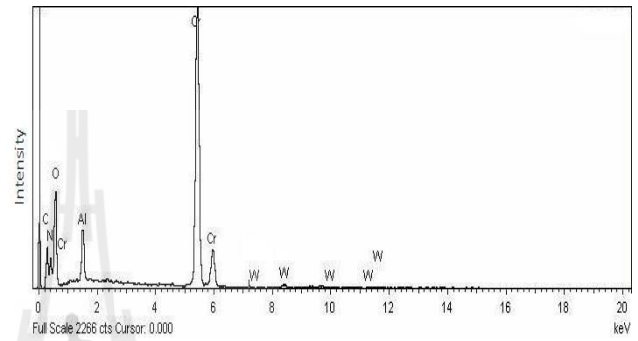
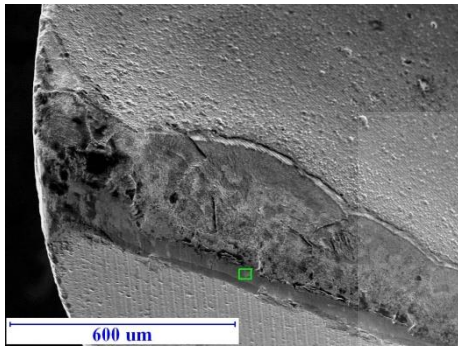
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด (Cutting speed) และ อุณหภูมิในการตัด (Cutting temperature) พบว่า ถึงแม้ในกระบวนการตัดจะใช้สารหล่อเย็นก็ตาม แต่อุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานถูกกัดและคมตัดจะยังคงเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการตัดถูกทำให้เพิ่มขึ้น ดังในรายงานวิจัยของ (Shane, Y. H., Yucheng, D. 2001)

ดังนั้นธาตุ O ที่ปรากฏขึ้นบริเวณรอยการสึกหรอ มีความเป็นไปได้ว่าในการทดสอบการกัดผิวมีโอกาสเกิดออกไซด์ขึ้น ดังนั้นจากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 สามารถอธิบายได้ว่า หลังทดสอบกัดผิว สารประกอบโครเมียมออกไซด์จะปรากฏบนผิวดอกกัดที่เคลือบด้วย AlCrN และสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์จะปรากฏบนผิวดอกกัดที่เคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

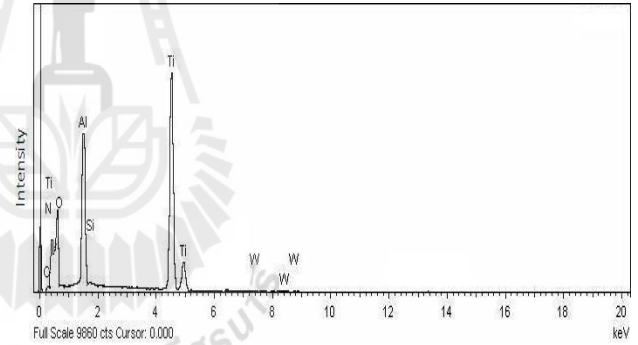
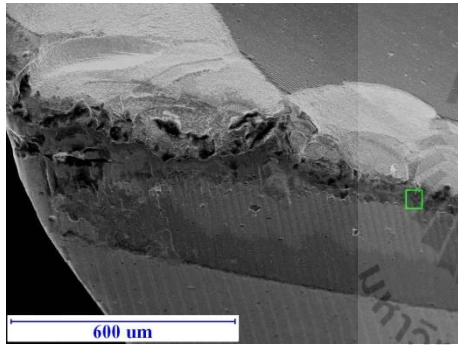
สำหรับประเภทออกไซด์ที่มีผลในการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการกระทบร้อน (Thermal protective) คือออกไซด์ฟิล์มของอะลูมิเนียมและโครเมียม และออกไซด์ที่มีผลต่อการเพิ่มการสึกหรอและความเสียดทานคือออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียม ดังนั้นบทบาทของออกไซด์ของธาตุไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ที่เกิดขึ้นจะให้ผลที่แตกต่างกัน (Mo, J.L., Zhu, M.H., 2009)



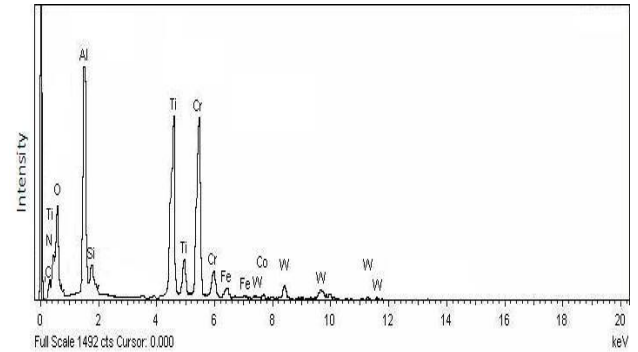
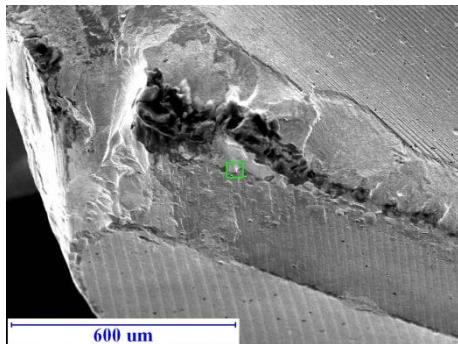
ก)



ข)



ค)



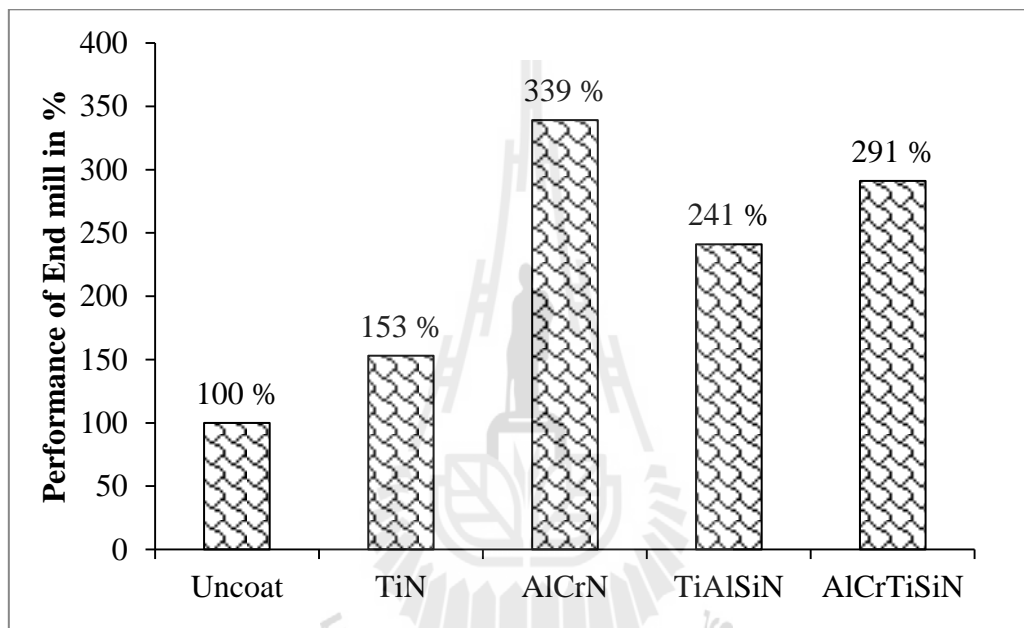
ง)

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณคมตัดของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ ก) TiN ข)

AlCrN ค) TiAlSiN และ ง) AlCrTiSiN

4.3.3 ประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวด้วยไอทางฟิสิกส์

รูปที่ 4.14 แสดงถึงประสิทธิภาพของดอกกัดหลังถูกเคลือบผิวโดยสรุปจากผลการทดสอบกัดผิวของดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN ซึ่งดอกกัดแต่ละชั้นเคลือบมีอายุการใช้งาน (Tool life) แตกต่างกันพบว่า ดอกกัดที่ถูกเคลือบโดยวิธีไอทางฟิสิกส์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าดอกกัดที่ไม่ผ่านการเคลือบถึง 53% สำหรับชั้นเคลือบ TiN, 141% สำหรับชั้นเคลือบ TiAlSiN, 191% สำหรับชั้นเคลือบ AlCrTiSiN และ 239% สำหรับชั้นเคลือบ AlCrN



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบโดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) หลังทดสอบกัดผิว

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุป

5.1.1 จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง สามารถเรียงลำดับค่าความแข็งของชั้นเคลือบจากต่ำสุดไปสูงสุดได้ดังนี้ AlCrN , TiN , TiAlSiN และ AlCrTiSiN

5.1.2 จากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซิงค์ของชั้นเคลือบ สามารถเรียงลำดับจากต่ำสุดไปสูงสุดได้ดังนี้ TiAlSiN , TiN , AlCrN และ AlCrTiSiN

5.1.3 การทำนายความต้านทานต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบ ไม่สามารถพิจารณาได้จากค่าความแข็งเพียงอย่างเดียว

5.1.4 จากการทดสอบการเกิดออกซิเดชันชั้นเคลือบ TiN และ TiAlSiN มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่าชั้นเคลือบ AlCrN และ AlCrTiSiN

5.1.5 จากการทดสอบในระดับปฏิบัติการใช้งานจริงโดยทดสอบกัดผิวเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 สามารถสรุปได้ว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าชั้นเคลือบ AlCrN เป็นผลให้ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN , TiAlSiN และ TiN มีอายุการใช้งานต่ำกว่าชั้นเคลือบ AlCrN

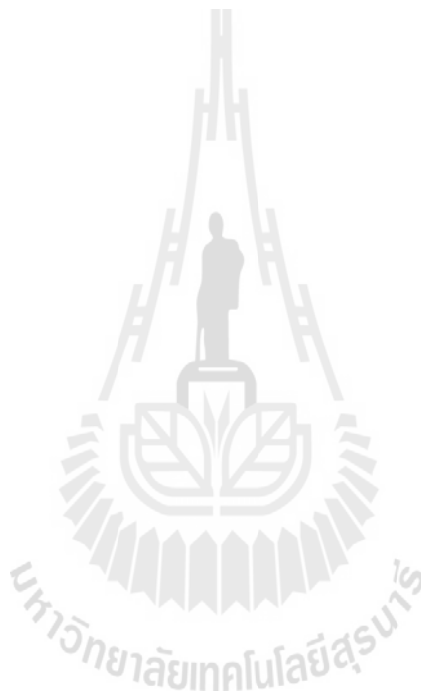
5.1.6 จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยสึกหรอของคมตัด พบว่าออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวคมตัดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากกระบวนการกัดผิว

5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลองต่อไป

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

5.2.1 ควรมีการศึกษาชั้นประสาน (Interlayer) เช่น การอบอ่อนชั้นประสาน ชนิดของชั้นประสาน เป็นต้น

5.2.2 ควรปรับตัวแปรในกระบวนการกัดผิวให้มีความแตกต่าง เช่น ทิศทางการเคลื่อนที่ของการกัด เป็นต้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการสึกหรออย่างชัดเจน



บรรณานุกรม

- 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., Maritz, 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 AIP-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 high temperatures. **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

โค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC



โค้ดโปรแกรมสำหรับใช้กับเครื่อง CNC

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

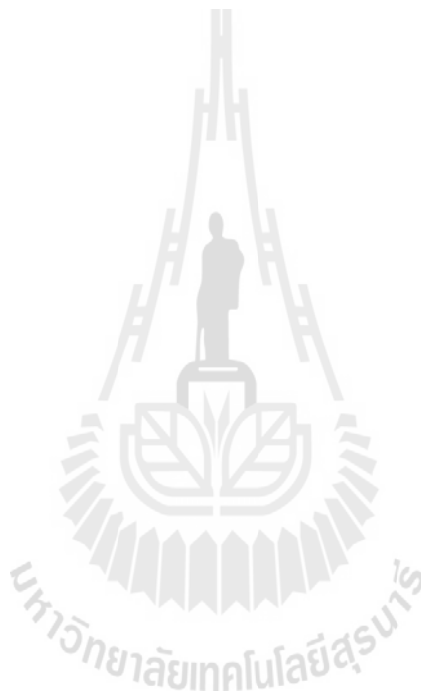
27 L Z-2.0 R F200 M90

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

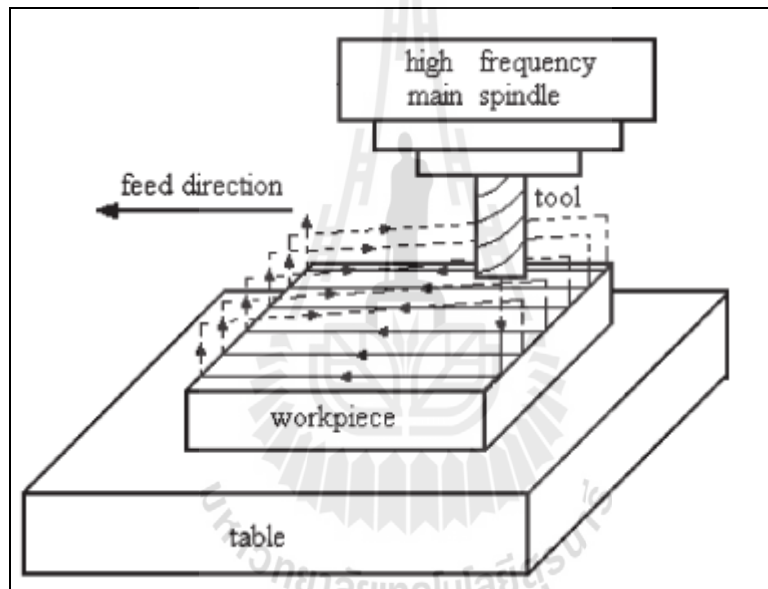
35 L X-5.0 R F M90

36 L Z150.0 R0 FMAX

37 L R F M30

38 END PGM LONK MM

โดยดอกกัดจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางดังแสดงในรูปที่ ก.1



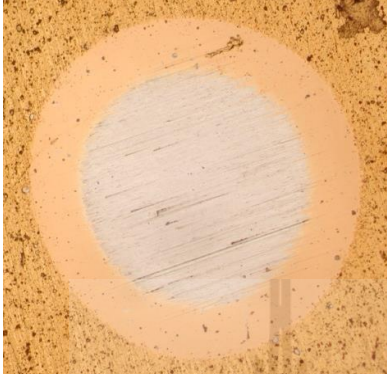


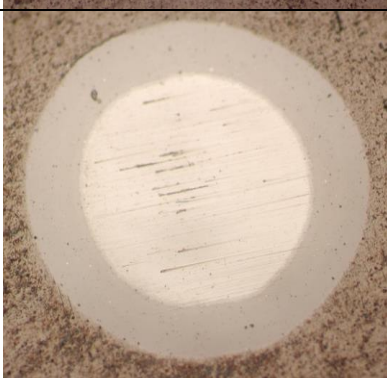
รูปที่ ก.1 ทิศทางเคลื่อนที่ของดอกกัดสำหรับการทดสอบ

ภาคผนวก ข

ค่าความหนาของชั้นเคลือบจากการทดสอบ Calotest



ตารางที่ ข.1 ค่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN
(ทดสอบโดยบริษัท นาโนซีลส์ จำกัด)

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

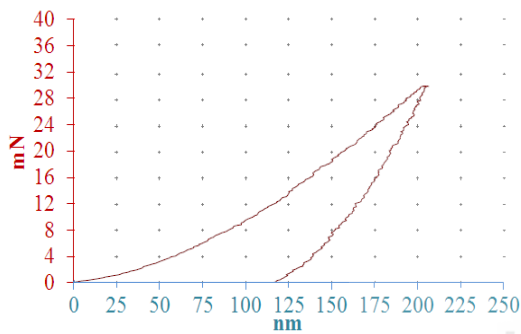
ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบที่ได้รับจากการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับนาโน (Nanoindentation)

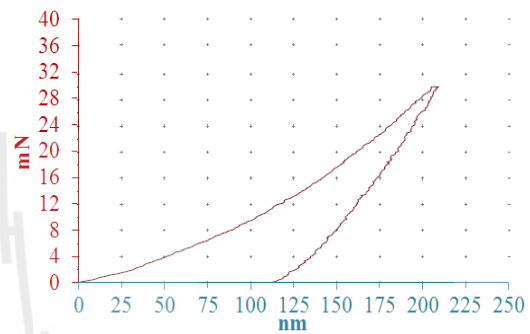


ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ TiN, AlCrN, TiAlSiN และ AlCrTiSiN

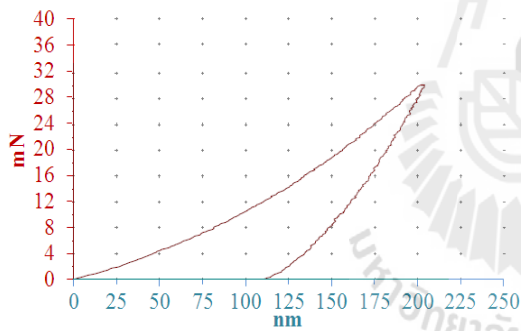
	Hardness (GPa)			
	AlCrTiSiN	TiAlSiN	TiN	AlCrN
avg	45	41	35	32
sd	4.64	2.53	0.58	1.71



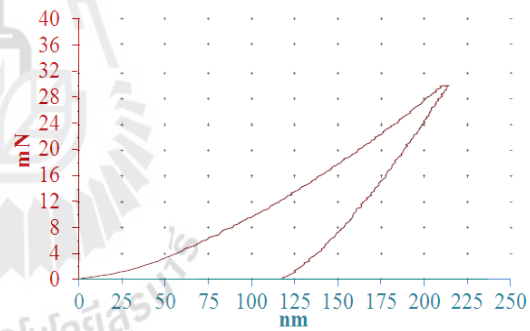
การวัดครั้งที่ 1



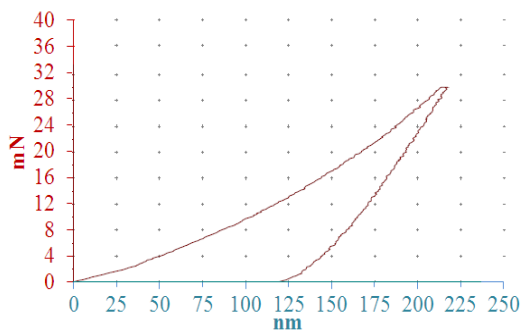
การวัดครั้งที่ 2



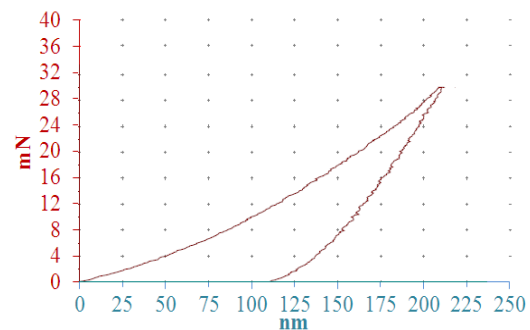
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4

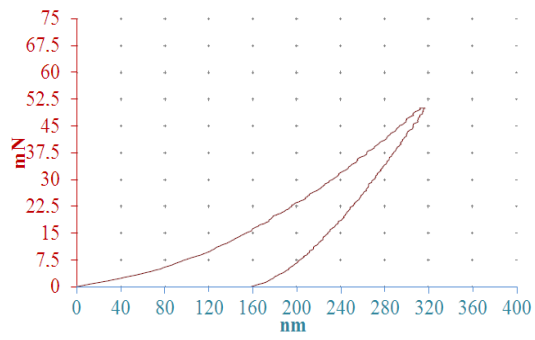


การวัดครั้งที่ 5

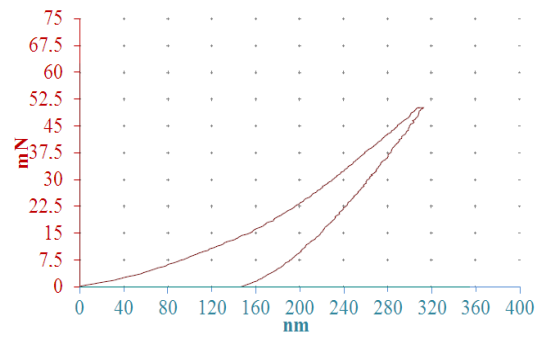


การวัดครั้งที่ 6

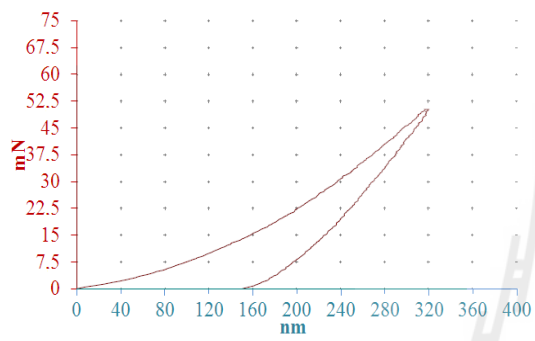
รูปที่ ค.1 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์



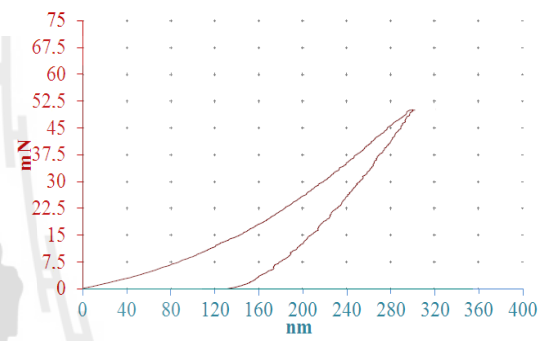
การวัดครั้งที่ 1



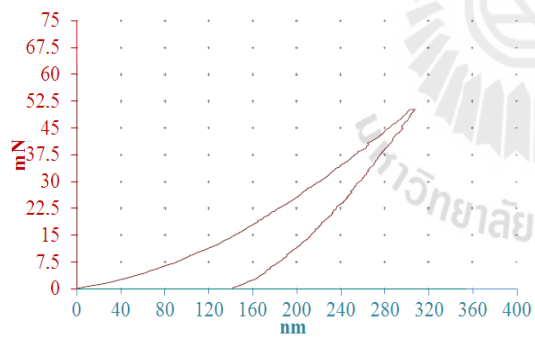
การวัดครั้งที่ 2



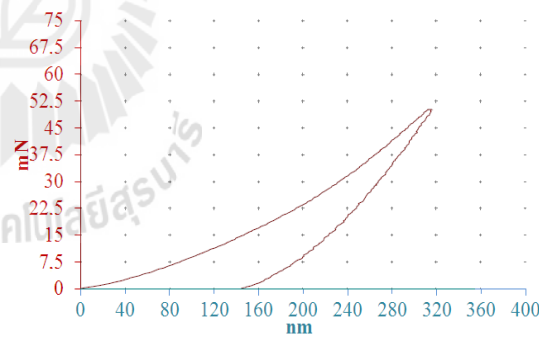
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4

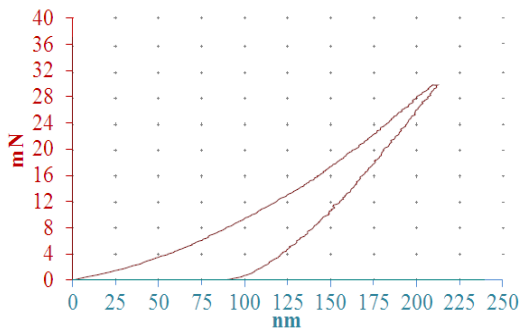


การวัดครั้งที่ 5

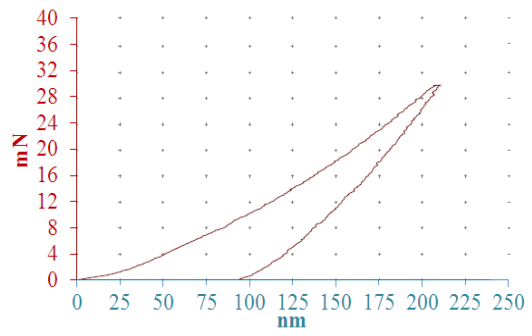


การวัดครั้งที่ 6

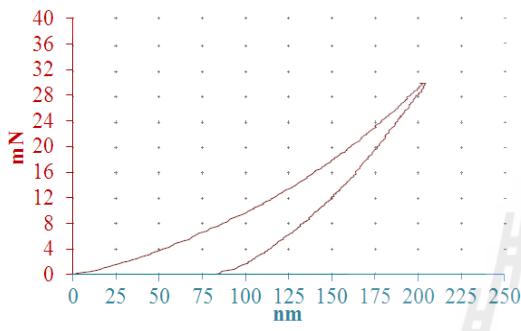
รูปที่ ค.2 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์



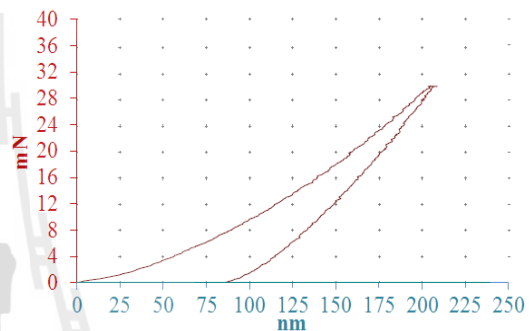
การวัดครั้งที่ 1



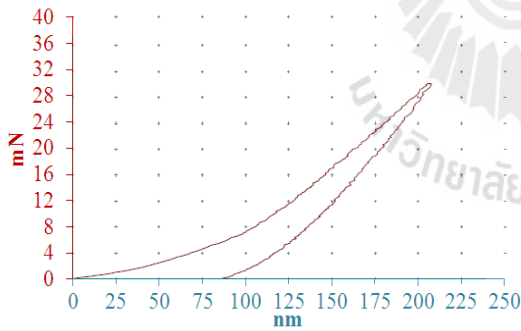
การวัดครั้งที่ 2



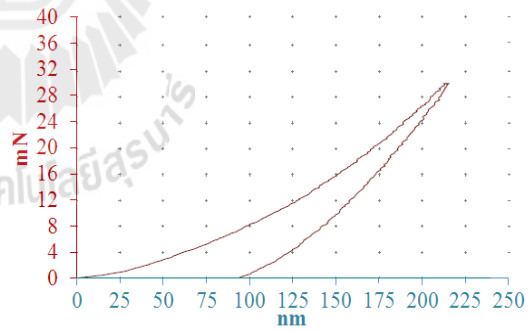
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4

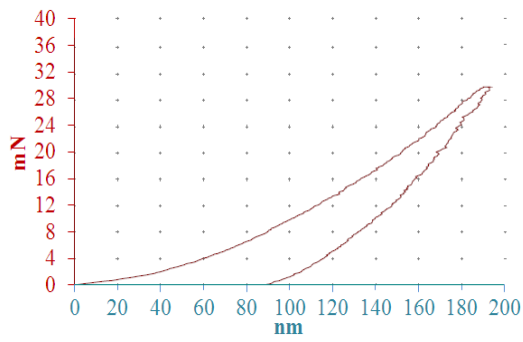


การวัดครั้งที่ 5

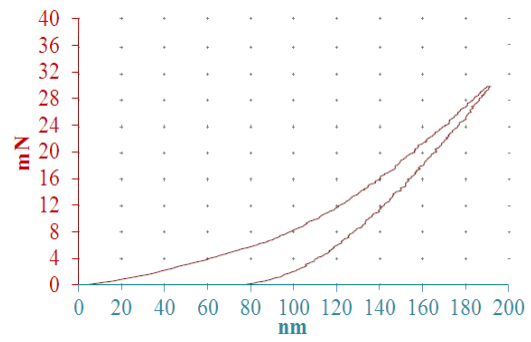


การวัดครั้งที่ 6

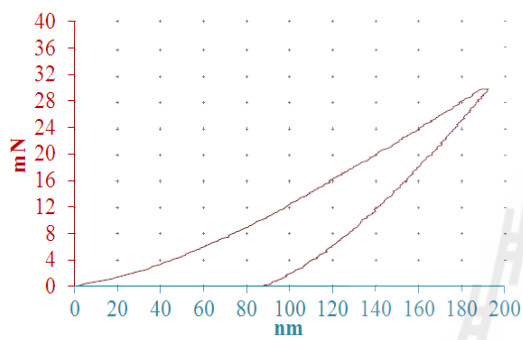
รูปที่ ค.3 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์



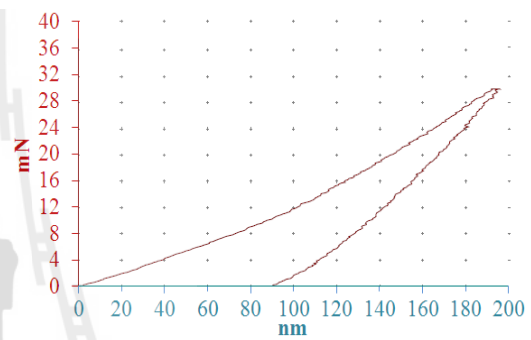
การวัดครั้งที่ 1



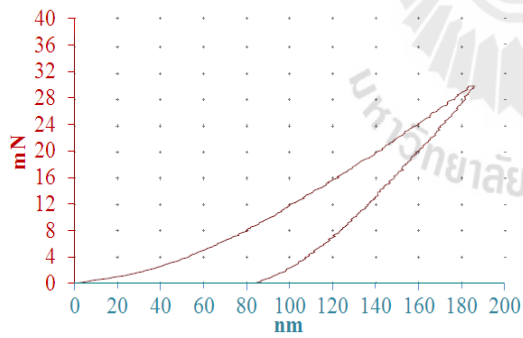
การวัดครั้งที่ 2



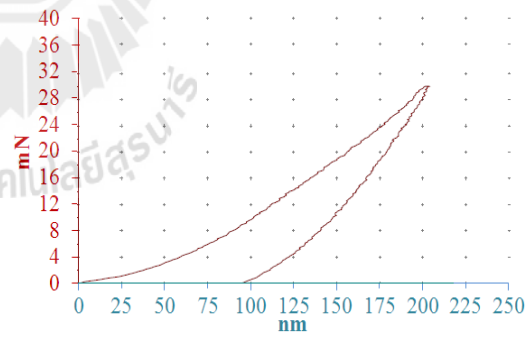
การวัดครั้งที่ 3



การวัดครั้งที่ 4



การวัดครั้งที่ 5



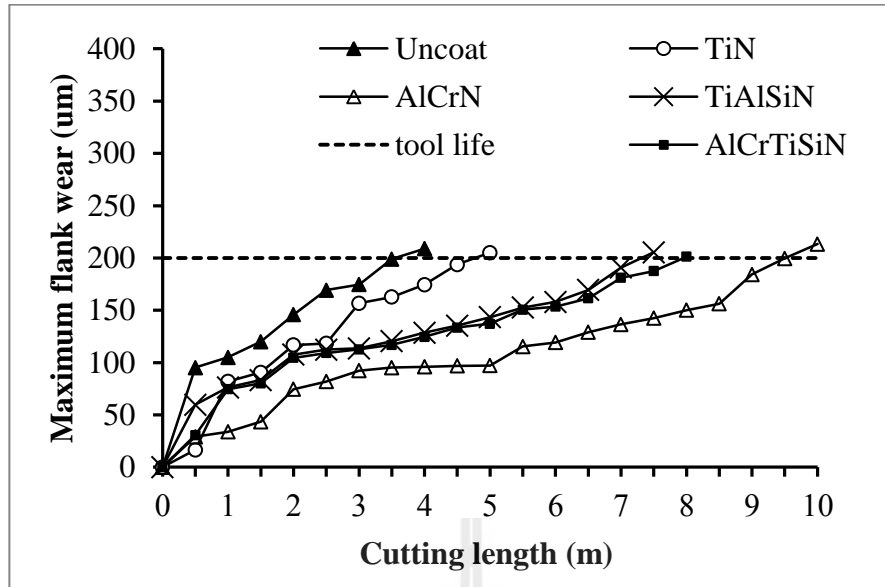
การวัดครั้งที่ 6

รูปที่ ค.4 ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอน
ไนไตรด์

ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบในระดับใช้งานจริง





รูปที่ 1 ผลการทดสอบกัดผิวชุดที่ 1 ค่าการสึกหรอของคมตัดสูงสุด (Maximum flank wear) ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบ โดยมีชั้นเคลือบคือ TiN, AlCrN, TiAlSiN, AlCrTiSiN และ ไม่ผ่านการเคลือบ (Uncoat) เทียบกับความยาวในการตัด (Cutting length) ภายใต้การใช้น้ำมันเป็นสารหล่อเย็น

ตาราง ง.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	avg	S D				
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 ง.1 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 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										

ตาราง ง.1 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 1 (ต่อ)

9											184	184	184	184	0.0										
											.39	.27	.33	.33	6										
9.5											199	199	199	199	0.3										
											.17	.63	.92	.57	8										
10											213	213	213	213	0.2										
											.52	.11	.37	.33	1										



ตารางที่ ง.2 ค่าการสึกหรอของดอกกัดจากการทดสอบใช้งานชุดที่ 2

ระยะ ดอก กัด เคลื่อน ที่ (m.)	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 ง.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 ง.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											
10.5											189	189	187	189	1.5											
											.91	.87	.23	.00	4											
11											196	196	197	196	0.4											
											.20	.55	.02	.59	1											
11.5											204	204	204	204	0.2											
											.10	.39	.53	.34	2											

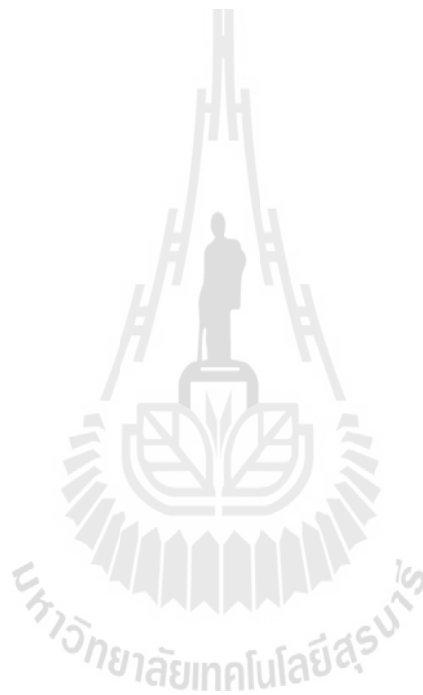
ภาคผนวก จ

ส่วนหนึ่งของรายงานการวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. 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.
2. Pornwasa Wongpanya, Surasak Surinphong, Jadesada Rujisomnapa, “Increasing Tool Life by AlCrTiSiN film”. 2013 International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE2013), Hong Kong, December 24-25, 2013.



ประวัติคณะผู้วิจัย

1. นางสาวพรสา วงศ์ปัญญา สำเร็จการศึกษา Doktor-Ingenieur in Mechanical Engineering จาก Helmut-Schmidt-Universität, Germany เมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 300000

2. นายสุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์ ผู้เชี่ยวชาญทางการพัฒนาชั้นเคลือบผิวแข็งด้วยวิธีไอทางฟิสิกส์ (PVD coating) ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งผู้จัดการทั่วไป บริษัท นาโน ซิลด์ จำกัด 261/61 หมู่ 2 ถนนปานวิถี ตำบลบางเพ็รง อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ

