

อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของ
ใบมีดโรตารีพรวนดิน

INFLUENCE OF COATING TYPES ON MECHANICAL PROPERTIES
OF ROTARY TILLER BLADES

ทิวาวรรณ เปลียนกลิ่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของ
ไบเมตโรตารีพรวนดิน


ทิวารรณ เปลี่ยนกลิ่น

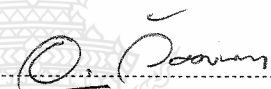
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน
Influence of Coating Types on Mechanical Properties of Rotary Tillers
Blade


ชื่อ - นามสกุล นางสาวทิวาวรรณ เปลี่ยนกลิ่น
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปรานีตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา วัฒนากา, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรกช สิริสุวัฒน์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของไบเมตโรตารีพรวนดิน
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวทิววรรณ เปลี่ยนกลิ่น
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.Ing.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

การสึกหรอของไบเมตโรตารีพรวนดินเป็นปัญหาที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของรถไถพรวนดินลดลง การพัฒนาเพื่อหาไบเมตพรวนดินที่มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานยาวนานจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่ควรได้รับการศึกษาและทำการแก้ไข งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กเครื่องมือและชนิดของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของคมตัดของไบเมตโรตารีพรวนดิน

โดยวัสดุในการทดลองประกอบด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400, เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S45C และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง เกรด SK5 ความหนา 7 มิลลิเมตร โดยนำวัสดุมาผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ซึ่งเป็นสภาพจริงของไบเมตโรตารีพรวนดินที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จากนั้นนำมาเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) ด้วยสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ความหนาของสารเคลือบประมาณ 2-3 ไมโครเมตร จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile strength) ทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ (Hardness Test) และทดสอบความต้านทานต่อการขีด (Scratch Test)

ผลการทดลองสรุปได้ว่า เหล็กกล้าคาร์บอนหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนในสภาวะที่กำหนด วัสดุ S45C มีค่า Tensile strength สูงที่สุดเท่ากับ 1149.27 N/mm² ซึ่งสูงกว่า SS400 (375.96 N/mm²) และ SK5 (1087.66 N/mm²) เมื่อนำวัสดุมาทำการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN พบว่าวัสดุ วัสดุ S45C มีความแข็งสูงสุด เมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบ TiN เท่ากับ 2722.79 HV และสารเคลือบ CrN เท่ากับ 1995.85 HV เมื่อทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุทั้ง 3 ชนิด 2 สารเคลือบ พบว่ามีลักษณะรอยขีดแบบ Conformal ซึ่งเป็นลักษณะรอยแตกจากการขีดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่สม่ำเสมอของสารเคลือบทั้งสองชนิด วัสดุ S45C ที่เคลือบด้วย TiN มีความเหมาะสมในการทำงานมากที่สุด

คำสำคัญ: ไบเมตโรตารี การเคลือบด้วยไอทางกายภาพ โครเมียมไนไตรด์ ไทเทเนียมไนไตรด์

Thesis Title Influence of Coating Types on Mechanical Properties of Rotary Tiller Blades
Name – Surname MissThiwawan Plienklin
Program Industrial and Manufacturing Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year 2022

ABSTRACT

Rotary blade wear is a problem that reduces the efficiency of the tiller. The development of efficient tillage blades with long service life is needed to be investigated and corrected. The purpose of this research was to investigate the influence of carbon steel and types of coatings affecting the wear behavior of cutting edge of rotary blades.

The materials in the experiment had three types of carbon steel comprising SS400, S45C and SK5, with a thickness of 7 millimeters. They were heat treated before coated with a physical vapor deposition (PVD) method with 2 types of coatings comprising titanium nitride (TiN) and chromium nitride (CrN). The thickness of the coating is about 2-3 micrometers. Then the specimens were tested for mechanical properties by three methods: a tensile strength method, hardness test and a scratch test.

The experimental showed that after heat treatment under specified conditions, S45C has the highest tensile strength of 1149.27 N/mm², which is higher than SS400 (375.96 N/mm²) and SK5 (1087.66 N/mm²) when the material is coated. According to the physical vapor method with TiN and CrN coatings, it was found that S45C material has the highest hardness. when coated with TiN coating equal to 2722.79 HV and CrN coating was 1995.85 HV. When testing the scratch resistance of all 3 materials and 2 coatings, it was found that the conformal abrasion was characterized by cracks from scratching, which demonstrates consistent adhesion of both coatings. TiN-coated S45C carbon steel is the most suitable in producing the rotary blade.

Keywords: rotary tiller blades, physical vapour deposition, chromium nitride, titanium nitride

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็น
อย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใน
ความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณไว้เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง กรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา วัฒนภา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณา
ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิตทุกท่าน ที่ให้ความรู้และใช้เครื่องมือ
เครื่องจักรในการทำงานวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบคุณรองอธิบดีกรมธนารักษ์ นายสำราญ เมืองนิล และผู้อำนวยการกองสถาปน์
นายวิรัช เกตุนวม ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูล และสนับสนุนวัสดุในการวิจัย

ขอขอบคุณนายวิเชียร พันแสน นายวรวิทย์ สงวนพันธ์ นายประวัติ เมืองมา และ
นายธีระยุทธ วงศ์สมานมณี ที่ช่วยให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและการทำงาน

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เคยได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิชาการ ผู้วิจัยจึง
ขอมอบความดีทั้งหมดนี้แก่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และท่านผู้มีพระคุณที่ยังมิได้กล่าวถึงทุกท่าน

ทิววรรณ เปลี่ยนกลิ่น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
บทที่ 1 บทนำ	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	13
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	13
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 การเตรียมดินเพื่อการเพาะปลูก	15
2.2 เครื่องพรวนจอบหมุนสำหรับรถแทรกเตอร์	15
2.3 ใบมีดโรตารีพรวนดิน	16
2.4 ทฤษฎีของวัสดุ	17
2.5 การเคลื่อนผิวด้วยไอนทางกายภาพ	22
2.6 การเคลื่อนผิวด้วยไอนทางเคมี	26
2.7 การทดสอบสมบัติทางกล	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	39
3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง	41
3.2 อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของไบมีดโรตารีพรวนดิน	46
3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	51
4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน	51
4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของไบมีดโรตารีพรวนดิน.....	53
4.3 การวิเคราะห์ผล	59
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต	60
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะการทดลอง	62
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะการทดลอง	62
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	68
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	73
ประวัติผู้เขียน	93

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 ชนิด	17
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SS400.....	18
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลสำหรับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SS400.....	18
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C.....	18
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลสำหรับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C.....	19
ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SK5.....	19
ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกลสำหรับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SK5.....	19
ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ SAE	20
ตารางที่ 2.9 สัญลักษณ์และองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051	21
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของการเคลือบ PVD ทั้ง 2 วิธี	23
ตารางที่ 2.11 ระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ	31
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของใบมีดจอบหมุนชนิดตัวซี	40
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของตัวอย่างใบมีดโรตารีพรวนดินในท้องตลาด (wt%) ..	41
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของเหล็กกล้า (wt%).....	41
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสามชนิดในสภาพจำหน่าย	41
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM..	41
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการทดสอบ..	52
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	59
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน	61
ตารางที่ ก.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SS400	69
ตารางที่ ก.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ S45C	69
ตารางที่ ก.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SK5	70
ตารางที่ ก.2.1 ผลการทดสอบการวัดความหนาของผิวเคลือบ	71
ตารางที่ ก.3.1 ผลการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ	72
ตารางที่ ก.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแกนกลางของวัสดุที่ผ่านการกระบวนการเคลือบ PVD (HV)..	72

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะการหมุนเป็นเกลียวของใบมีดจอบหมุน	15
รูปที่ 2.2 ใบมีดไถจอบหมุนแบบต่างๆ	16
รูปที่ 2.3 รัศมีการตัดและขนาดของใบมีดทั้ง 3 ชนิด	17
รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการ PVD Sputtering	23
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ PVD Evaporation	23
รูปที่ 2.6 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่าง ๆ	24
รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ	25
รูปที่ 2.8 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด	25
รูปที่ 2.9 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ (a) TiN-monolayer, (b) CrN-monolayer, (c) และ (d) TiN/CrN multilayer	26
รูปที่ 2.10 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบใช้สกรู หรือไฮดรอลิกส์	27
รูปที่ 2.11 กราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่แตกต่างกัน	28
รูปที่ 2.12 (ก) การแตกแบบถ้วยและกรวย (Cup and Cone) (ข) การแตกเปราะ (Brittle)	28
รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ มาตรฐาน ASTM E 92	29
รูปที่ 2.14 หลักการทั่วไปของ scratch tester	30
รูปที่ 2.15 รูปผลการทดสอบ Ti/AlN ทดสอบในประเทศญี่ปุ่น	31
รูปที่ 2.16 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งมีลักษณะรอยขีดแบบ Chevron tracks และ LC ₁ แสดงจุดเริ่มต้นของทิศทางการเกิดรอยขีดข่วน	32
รูปที่ 2.17 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งมีลักษณะรอยขีดแบบ Chevron tracks และ LC ₂ (ก) local interfacial spallation (ข) gross interfacial spallation.....	32
รูปที่ 2.18 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนจนถึงพื้นผิวของวัสดุ และ LC ₃ วัดจากขอบที่ใกล้กึ่งกลางรอยขีดข่วน	33
รูปที่ 2.19 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งลากผ่านไปยังบริเวณที่เกิดความบกพร่องของชิ้นงานอาจส่งผลให้ค่าแรงวิกฤตผิดพลาด	33
รูปที่ 2.20 แผนภาพที่ได้จาก sensor ในเครื่อง scratch test บนฟิล์ม TiN/TiCN แบบ multilayer ของผู้ผลิตรายหนึ่งในยุโรป	34
รูปที่ 2.21 ภาพขยายของรอยขีดข่วนจากเครื่อง scratch test บนฟิล์ม TiN/TiCN แบบ multilayer	34
รูปที่ 2.22 พฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของแผนภาพแต่ละเส้น	35

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 ภาพขยายของความเสียหายบนฟิล์มผลมาจากการขีดด้วยเครื่อง Scratch test	35
รูปที่ 2.24 ภาพการขีดด้วยเครื่อง Scratch test และชื่อเรียกลักษณะรอยขีด	36
รูปที่ 3.1 ไบมีดพรวนดินชนิดตัวซี	40
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างไบมีดพรวนดินชนิดตัวซี	40
รูปที่ 3.3 เครื่องขัดผิวแบบล้อผ้า	42
รูปที่ 3.4 (ก) รูปชิ้นงานก่อนขัด (ข) รูปชิ้นงานหลังขัด	42
รูปที่ 3.5 เครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก	43
รูปที่ 3.6 การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแก๊สไนโตรเจน	43
รูปที่ 3.7 (ก) Cr Cathode (ข) Ti Cathode	44
รูปที่ 3.8 การบรรจุชิ้นงานภายในห้องชุบ	44
รูปที่ 3.9 เครื่องชุบเคลือบผิว	45
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังชุบเคลือบผิว (ก) โครเมียมไนไตรต์ (ข) ไทเทเนียมไนไตรต์	45
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	46
รูปที่ 3.12 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ และอบคืนตัวของวัสดุที่จะมาทำไบมีดพรวนดิน	47
รูปที่ 3.13 ลักษณะชิ้นงานและขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด	48
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน	48
รูปที่ 3.15 (ก) เครื่องทดสอบ Scratch Test (ข) แรงกระทำวิกฤตในช่วงต่างๆ	49
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนของวัสดุ SS400 S45C และ SK5	51
รูปที่ 4.2 ความหนาของผิวเคลือบ (ไมโครเมตร)	53
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของผิวเคลือบที่มีผลต่อค่าความแข็ง (HV) ของวัสดุ	54
รูปที่ 4.4 critical loads (LC1)เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN	55
รูปที่ 4.5 critical loads (LC2)เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN	56
รูปที่ 4.6 critical loads (LC3)เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN	56
รูปที่ 4.7 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด SS400/CrN	57
รูปที่ 4.8 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด S45C/CrN	57
รูปที่ 4.9 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด SK5/CrN	57
รูปที่ 4.10 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด SS400/TiN	58

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด S45C/TiN	58
รูปที่ 4.12 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด SK5/TiN	58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สินค้าเกษตรเป็นหนึ่งในสินค้าที่มีความสำคัญในการหล่อเลี้ยงชีวิตให้กับคนไทยมาอย่างยาวนาน ทั้งด้านการอุปโภค บริโภคภายในประเทศและการส่งออก และยังเป็นส่วนหนึ่งที่ใช้ในการผลิตสินค้าเพื่อใช้ในชีวิตรประจำวัน รวมถึงการแปรรูปต่างๆอีกด้วย การทำเกษตรกรรมเป็นงานที่มีความเหนื่อยยาก ทำให้ผู้ประกอบการอาชีพนี้ลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลการสำรวจของสำนักเศรษฐกิจการเกษตรพบว่า ในปีการเพาะปลูก 2561/2562 เกษตรกรมีอายุเฉลี่ย 58.46 ปี ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปี 2560/2561 ที่มีอายุเฉลี่ย เท่ากับ 58.09 ปี [1] ซึ่งในอนาคตประเทศไทยมีโอกาสในการเกิดปัญหาวิกฤตทางการเกษตรเนื่องจากเกษตรกรเข้าสู่สังคมสูงวัย ทำให้คุณภาพแรงงานและประสิทธิภาพการผลิตลดลง เครื่องจักรกลการเกษตรจึงมีความสำคัญที่จะช่วยให้อุตสาหกรรมการเกษตรของประเทศไทยมีความยั่งยืน เพื่อให้ได้ผลผลิตคุณภาพดีและทำให้สามารถขายผลผลิตได้ราคาดีนั้น นอกจากการคัดเลือกพันธุ์พืชที่สายพันธุ์ดี ขั้นตอนการเตรียมพื้นที่เพื่อการเพาะปลูกพืชก็ถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหากพรวนดินได้อย่างมีคุณภาพ พืชจะสามารถดูดซึมธาตุอาหารภายในดินได้เป็นอย่างดี และเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ รถแทรกเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่เกษตรกรนิยมใช้เพื่อเป็นเครื่องทุ่นแรง

ในปัจจุบันมีการใช้งานรถแทรกเตอร์การเกษตรเพื่อปรับพื้นผิวดิน รถแทรกเตอร์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญและมีส่วนช่วยในการเป็นเครื่องจักรต้นกำลัง ในการทำการเกษตร นอกจากแนวคิดในการพัฒนาระบบควบคุมใบมีดให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ต่างๆแล้ว ยังคงต้องพัฒนาใบมีดให้มีความคงทนแข็งแรงเมื่อใช้ร่วมกับรถแทรกเตอร์ เพื่อให้ทำงานได้สะดวกรวดเร็ว อุปกรณ์ไถจอบหมุนเป็นอุปกรณ์ที่เกษตรกรใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เป็นอุปกรณ์เตรียมดินสำหรับไถและพรวน โดยใช้กำลังเพลลาอำนาจกำลัง (P.T.O. Shaft) จากรถแทรกเตอร์ไปขับเคลื่อนเพลลาของเครื่องโรตารีเพื่อหมุนเพลลาโรตารี เมื่อใบมีดตีลงไปบนดินจะทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction) เกิดการสะท้อนของใบมีดทำให้ใบมีดเกิดความสึกหรอ หรือหัก เกิดความเสียหาย ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนใบมีด

จากสมบัติดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์ม และศึกษาถึงชนิดของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน งานวิจัยนี้จึงพัฒนาสมบัติเชิงกลของใบมีดพรวนดินด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ เพื่อเพิ่มสมบัติทางความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอนที่หาได้ง่ายและราคาถูก เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเครื่องจักรกลของเกษตรกร อีกทั้งเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตใบมีดพรวนดินและอุตสาหกรรมโลหะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดของเหล็กเครื่องมือที่มีผลพฤติกรรมการสึกหรอของคมตัด

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของคมตัด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 กำหนดปัจจัยอิสระของชิ้นงานตัวอย่างใบมีดโรตารี

- 1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400, เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SK5
- 2) ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง 7 มิลลิเมตร
- 3) เคลือบผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapour Deposition; PVD) ด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN)

1.3.2 กำหนดความหนาของผิวเคลือบประมาณ 3 μm

1.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

- 1) ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Property)
- 2) ทดสอบการยึดเกาะของสารเคลือบบนใบมีด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานตัวอย่างใบมีดโรตารีที่เคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD)

1.4.2 ทราบถึงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุใบมีด

1.4.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการเลือกวัสดุและสารเคลือบที่มีความแข็ง และ ต้านทานการสึกหรอสูงได้

1.4.4 สามารถนำผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาการผลิตใบมีดโรตารีในอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิตและช่วยยืดอายุการใช้งานของใบมีด

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเตรียมดินเพื่อการเพาะปลูก

การเตรียมดินเพื่อการเพาะปลูกเป็นขั้นตอนที่สำคัญ มีจุดประสงค์เพื่อขุดพลิกหน้าดินที่แห้งกรังให้ร่วนซุยและเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของต้นพืช เมื่อให้แรงผ่านเครื่องมือไถไปกระทำต่อดิน ทำให้ดินแตกตัวออกจากกัน อีกทั้งยังช่วยกำจัดวัชพืชบริเวณผิวดิน คลุกเคล้าซากพืช ต่อซัง ลงสู่ดิน ทำให้เนื้อดินได้รับออกซิเจน มีความพรุนตัวส่งผลให้ได้ผลผลิตที่ดีขึ้น [2]

ความสำคัญและประโยชน์ในการเตรียมดินคือ

- 1) ควบคุมและจัดการกับวัชพืชในดินให้หมดไปจากพื้นที่ปลูก ไม่ให้เกิดการแย่งปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ แสง น้ำ และแร่ธาตุต่างๆ ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่
- 2) สามารถปรับโครงสร้างทางกายภาพของดินให้ดีขึ้น เช่น การเพิ่มช่องว่างภายในดิน ทำให้ปริมาณอากาศภายในดินเพิ่มขึ้น สามารถรักษาความชื้นและระบายน้ำได้ดี ตลอดจนทำให้ดินมีขนาดเล็กลง จึงเหมาะต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดและต้นกล้า
- 3) เป็นการจัดเตรียมแปลงเพาะปลูก เตรียมแถวปลูกให้เหมาะสม และสะดวกต่อการใช้อุปกรณ์ทางการเกษตร เช่น รถไถ รถพรวนดิน

ในปัจจุบันการเตรียมดินสำหรับการเพาะปลูก จะมีการนำเครื่องจักรมาใช้ทดแทนแรงงานคนกันอย่างแพร่หลาย เพื่อการทำงานอย่างรวดเร็ว การเตรียมพื้นที่เพาะปลูก มี 2 ขั้นตอน ดังนี้

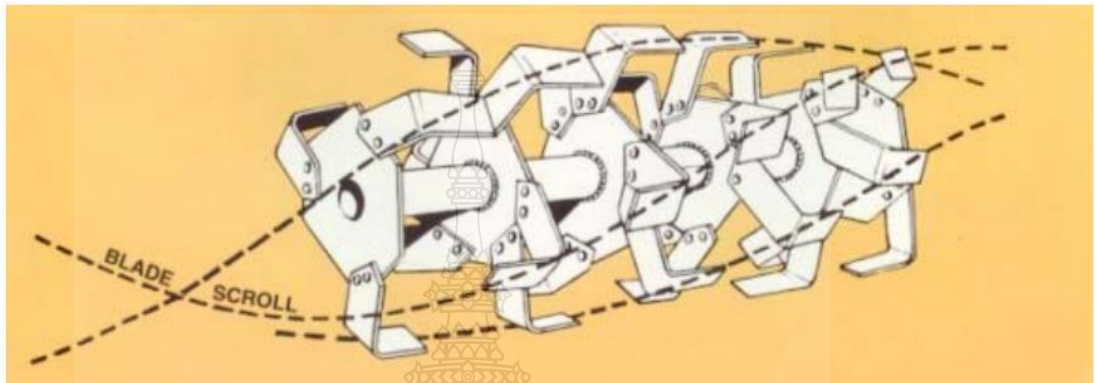
- 1) การไถตะ เป็นการไถครั้งแรก (Primary tillage) มักไถตามแนวยาวของที่นา ช่วยพลิกดินจากด้านล่างให้ขึ้นมารับออกซิเจนด้านบน ในบางพื้นที่จะไถหลังฝนตก เนื่องจากดินมีความชุ่มชื้น หากฝนไม่ตกจะต้องทำการปล่อยน้ำเข้ามายังพื้นที่เพื่อทำให้ดินนิ่มขึ้น เมื่อทำการไถตะดินจะแตกออกจากกัน และกลบตอพืชและวัชพืช ดินที่แตกออกจากกันนี้ยังไม่เหมาะกับการปลูกพืช เนื่องจากอนุภาคของดินยังคงมีขนาดใหญ่ เครื่องมือที่นิยมใช้การเตรียมดินครั้งแรกได้แก่ ไถหัวหมู ไถจาน และ ไถดินดาน เป็นต้น

- 2) การไถแปร เป็นการไถครั้งที่สอง (Secondary tillage) เป็นการย่อยดินจากการไถครั้งแรกให้มีขนาดเล็กลง เหมาะสมต่อปลูกพืช อีกทั้งยังช่วยเกลี่ยดินให้ผิวดินเรียบขึ้น หรือในบางครั้งจะมีอุปกรณ์ที่เป็นลักษณะลูกกลิ้งเล็กๆ ลากตามอีกครั้งหนึ่งเพื่อบดอัดผิวดินเล็กน้อย เครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ จานพรวน ผานพรวน จอบหมุน ไถพรวนเหล็กสปริง และไถพรวนเหล็กแหลม เป็นต้น

2.2 เครื่องพรวนจอบหมุนสำหรับรถแทรกเตอร์

จอบหมุน (Rotary cultivator) เป็นเครื่องมือที่สามารถเตรียมดินได้กว้างกว่าเครื่องมือชนิดอื่น เกษตรกรจะต่อพรวนไถจอบหมุนพ่วงกับรถแทรกเตอร์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการเตรียมดินสำหรับการเพาะปลูกหรือการตีเทือก ช่วยผสมคลุกเคล้าดินให้เข้ากันได้ดีกับอินทรีย์วัตถุที่เป็นอาหาร

ของพีช กำจัดวัชพืชบนหน้าดิน เป็นต้น การทำงานของจอบหมุนจะอาศัยเพลลาอำนาจกำลัง (Power take of, PTO) ทำหน้าที่ขับเพลลาของใบมีดให้หมุนสับดินให้แตกออกเป็นก้อนขนาดเล็ก สำหรับการจัดเรียงใบมีดบนเพลลานั้นจะต้องจัดเรียงให้มีลักษณะเป็นเกลียวตามกัน เนื่องจากจะทำให้การกระแทกของใบมีดต่อดินนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่า การติดตั้งในลักษณะอื่น



รูปที่ 2.1 ลักษณะการหมุนเป็นเกลียวของใบมีดจอบหมุน

ส่วนประกอบของจอบหมุน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

- 1) กระจงโหมไถ (Head stock or mast) ทำหน้าที่ในการต่อเข้ากับแขนบนหรือแขนกลางของรถแทรกเตอร์ ใช้ปรับตำแหน่งชุดไถในแนวตั้ง รับแรงดึงและดันที่กระทำต่อชุดไถ
- 2) จุดต่อแขนล่าง (Hitch point) เป็นจุดยึดแขนบนและล่างของรถแทรกเตอร์
- 3) คลัตช์นิรภัย (Safety clutch) ทำหน้าที่ในการป้องกันความเสียหายจากการทำงานเกินกำลัง โดยจะตัดกำลังจากเพลลาอำนาจกำลังไปยังห้องเกียร์
- 4) กระจุกเกียร์ (Gear box) ภายในห้องเกียร์จะมีชุดของเฟืองซึ่งจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรอบของการหมุนของเพลลาของใบมีดโดยให้มีรอบของการหมุนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ภายในจะบรรจุน้ำมันหล่อลื่นไว้ด้วย
- 5) ห้องโซ่ (Chain case) ทำหน้าที่ห่อหุ้มเฟืองตัวขับ ตัวตาม และโซ่ ซึ่งนอกจากจะเป็นการทดรอบแล้วยังเป็นการเพิ่มกำลังให้แก่ชุดเพลลาของใบมีดตัดดินด้วย
- 6) ฝากระโปรงหลัง (Rear shield) จะส่งผลต่อขนาดอนุภาคดิน หากเปิดฝากระโปรงหลังในขณะที่ทำการไถ จะได้ก้อนดินอนุภาคใหญ่และวัชพืชจะถูกเหวี่ยงขึ้นมาบนพื้นดิน ในกรณีที่ปิดฝากระโปรงหลัง จะได้ก้อนดินอนุภาคเล็กและวัชพืชจะถูกสับลงไปบนดิน นอกจากนี้ยังช่วยเกลี่ยดินให้สม่ำเสมออีกด้วย
- 7) ล้อบังคับความลึก (Depth wheel) ทำหน้าที่ในการบังคับความลึกในการไถ ช่วยให้ดินในบริเวณนั้น มีความลึกใกล้เคียงกัน
- 8) ใบมีด (Blades) จะทำหน้าที่ในการย่อยดินให้มีขนาดเล็ก โดยจะมีจำนวนของใบมีดอยู่ 2-3 คู่ นิยมใช้กันอยู่ด้วยกันหลายแบบตามลักษณะงานและสภาพของพื้นที่ ได้แก่

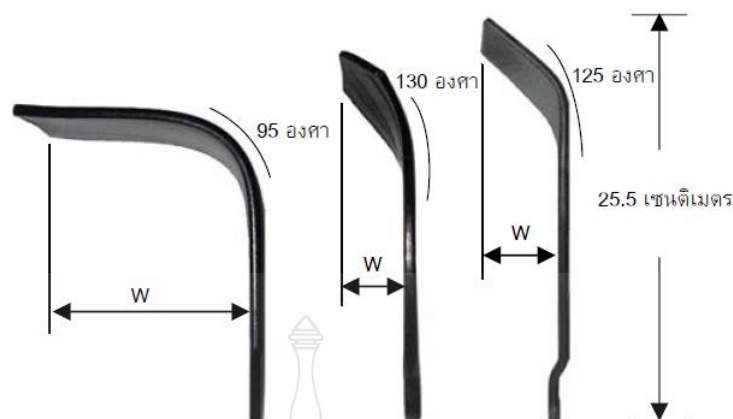
- Power blade เป็นใบมีดที่ใช้งานทั่วไป เหมาะกับดินทุกสภาพ
 - Super power blade ใบมีดจะมีความหนามากกว่าปกติ เพื่อลดอัตราการสึกหรอ เหมาะสำหรับการใช้งานหนัก ต้องใช้กำลังจากรถแทรกเตอร์ในการขับใบมีดมากยิ่งขึ้น
 - Speed blade เป็นใบมีดที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีสภาพเปียกหรือมีวัชพืชอยู่บนแปลงมาก
 - Long shank blade สำหรับใช้ในการไถที่ความลึกมาก
 - Splitting blade เหมาะสำหรับดินแข็ง ช่วยให้ดินแตกออกจากกันได้ดี
9. เฟลา (Rotors) เป็นที่ยึดของใบมีดและจอบหมุนใบมีด บางแบบสามารถถอดเปลี่ยนหรือให้เหมาะสมกับสภาพดินได้

2.3 ใบมีดโรตารีพรวนดิน

ใบมีดโรตารีพรวนดินในปัจจุบัน นิยมทำจากเหล็กเหน็บ เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง สามารถชุบแข็งได้ ในกระบวนการผลิตจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติของใบมีดเพื่อให้มีความทนทาน โดยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็ง ความเหนียว มีความต้านทานต่อการสึกหรอ เพื่อให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น ในกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนท์ และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จนเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ผสมกัน ในปัจจุบันมีรูปร่างแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งเป็นใบมีดที่เกษตรกรใช้กับเครื่องพรวนจอบหมุน ได้แก่ ใบมีดจอบหมุนชนิดตัวแอล ชนิดตัวซีและชนิดผสมตามลำดับ โดยรัศมีการตัดและขนาดโดยสังเขปของใบมีดทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 2.2 ใบมีดไถจอบหมุนแบบต่างๆ [3]



รูปที่ 2.3 รัศมีการตัดและขนาดของใบมีดทั้ง 3 ชนิด [4]

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 ชนิด[5]

ชนิดใบมีด	ชนิดตัวแอล	ชนิดตัวซี	ชนิดผสม
ความหนาจากด้ามถึงปลาย (มม.)	6	8-5 (แบบเรียวยาว)	6
ความกว้างที่ด้ามและที่ปลายใบมีด (มม.)	95-88	22-55	60
องศาการตัด	95°	130°	125°
รัศมีตัด (มม.)	30	50	50
รัศมีการหมุน วัดจากกึ่งกลางเพลาลงถึงปลายใบมีด (มม.)	230	197	235
ความกว้างการตัดทราย W (มม.)	140	45	60

2.4 ทฤษฎีของวัสดุ

2.4.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) คือ เหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นธาตุผสมหลัก โดยมีปริมาณไม่เกิน 2% โดยทั่วไปแล้วมันมีธาตุอื่นๆเจือปนมาด้วยเล็กน้อย ได้แก่ แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 1.65% ซิลิกอน (Si) ไม่เกิน 0.6% หรือเหล็กกล้าดีคาบูไรซ์ (Decarburizing steel) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (Ultra low carbon steel) คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปริมาณ 0.04 – 0.15% ปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กจะมีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็ก เช่น ความเหนียวของเหล็กลดลง เหล็กมีความแข็งสูงขึ้น ความสามารถในการเชื่อมลดลง ความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น เป็นต้น ในการใช้งานจะจำแนกเหล็กคาร์บอนตามส่วนผสมของคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.4.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) คือ เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.2% เป็นเหล็กเหนียว ความแข็งต่ำ ความสามารถขึ้นรูปและแปรรูปได้ง่าย เนื่องจากเป็นเหล็กที่

มีความแข็งต่ำ การชุบผิวแข็งโดยตรงทำได้ยาก แต่สามารถชุบผิวแข็งได้โดยใช้วิธีการบ่มแก๊สคาร์บอนที่ผิวก่อน เพื่อให้เกิดการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปยังผิวของเหล็ก ด้วยความร้อนและอุณหภูมิสูง ในเวลาที่เหมาะสม ตัวอย่างการนำมาใช้งาน เช่น หม้อน้ำรถยนต์ ท่อน้ำประปา เหล็กเส้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เหล็กเคลือบดีบุก เช่น กระจองบรรจุอาหาร เหล็กเคลือบสังกะสี เช่น แผ่นหลังคา ตัวถังยานพาหนะ งานย้ำหมุด สกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร โซ่ บานพับประตู

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 [6]

Type	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo
SS400	0.18-0.23	0.30-0.60	< 0.04	< 0.05	-	-	-	-

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 [6]

Type	SS400
Tensile strength (MPa)	400 - 510
Yield strength (MPa)	205 - 245
Young's Modulus (GPa)	190 - 210
%Elongation	17 - 21
Hardness (HB)	160

2.4.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) คือ เหล็กที่มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำ แต่มีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่าและยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.2-0.59% เหมาะกับงานที่ต้องการความเค้นดึงปานกลาง ทนต่อการสึกหรอ และต้องการความแข็งแรง เช่น อะไหล่เครื่องจักรกล รางรถไฟ เพลากล่องกล แกนล้อ เพล่า ก้านสูบ สปริง ชิ้นส่วนรถไถนา ไชควง ท่อเหล็ก นอต สกรูที่ต้องแข็งแรง

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C [7]

Type	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo
S45C	0.42-0.48	0.60-0.90	< 0.03	< 0.035	-	-	-	-

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C [7]

Type	S45C
Tensile strength (MPa)	686
Yield strength (MPa)	490
Young's Modulus (GPa)	205
%Elongation	17
Hardness (HB)	201 - 269

2.4.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง และทนความเค้นแรงดึงสูง มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.6-2.0% สามารถทำการชุบแข็งได้แต่จะเปราะ เหมาะสำหรับ ชิ้นส่วนที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหล่อ เช่น ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดคiling เลื่อยตัดเหล็ก การทำเกลียว (Tap) ตะไบ

ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SK5 [8]

Type	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo
SK5	0.42-0.48	0.60-0.90	< 0.03	< 0.035	-	-	-	-

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SK5 [8]

Type	SK5
Tensile strength (MPa)	1158
Yield strength (MPa)	1034
Young's Modulus (GPa)	190 - 210
%Elongation	15
Hardness (HB)	335

2.4.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy steels)

เหล็กกล้าผสม คือ เหล็กที่ผสมธาตุหลักอื่นๆ นอกเหนือจากธาตุผสมที่มีอยู่แล้วในเหล็กคาร์บอน เช่น ซิลิกอน นิกเกิล หรือโครเมียม ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้จะส่งผลให้เหล็กกล้าผสมมีสมบัติบางอย่างเพิ่มเติมเช่น เพิ่มสมบัติทางกล เพิ่มความสามารถต่อแรงกระแทก รักษาผิวให้แข็ง เพิ่มความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy

steel) คือเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่รวมแล้วต่ำกว่า 10% มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเหล็กคาร์บอนต่ำ และเหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) คือเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่มากกว่า 10% จะทนต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอเพิ่มขึ้น

2.4.3 ระบบมาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรม

2.4.3.1 มาตรฐานอุตสาหกรรมอเมริกา แบ่งออกเป็น 2 มาตรฐานคือ มาตรฐานสมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute : AISI) และมาตรฐานสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineer : SAE) โดยมีการระบุตัวเลขขึ้นมา 4 ตัว ตัวแรกคือชนิดของเหล็กกล้า ตัวที่สองคือ ระบุถึงชนิดของธาตุผสม และตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงปริมาณคาร์บอน เช่นตัวอย่าง AISI4140 คือเหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE1012 คือเหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ SAE [9]

AISI No.	SAE No.	Chemical Composition Limits (%)			
		C	Mn	P	S
1008	1008	0.10 max.	0.30/0.50	0.04	0.05
1010	1010	0.08/0.13	0.30/0.50	0.04	0.05
1012	1012	0.10/0.15	0.30/0.60	0.04	0.05
1015	1015	0.13/0.18	0.30/0.60	0.04	0.05
1016	1016	0.15/0.20	0.60/0.90	0.04	0.05
1017	1017	0.15/0.20	0.30/0.60	0.04	0.05
1018	1018	0.15/0.20	0.60/0.90	0.04	0.05
1019	1019	0.18/0.23	0.70/1.00	0.04	0.05
1020	1020	0.18/0.24	0.30/0.60	0.04	0.05
1021	1021	0.18/0.25	0.60/0.90	0.04	0.05
1022	1022	0.20/0.25	0.70/1.00	0.04	0.05
1023	1023	0.19/0.25	0.30/0.60	0.04	0.05

2.4.3.2 มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น จัดทำโดยสำนักงานมาตรฐานญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard, JIS) มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพและมาตรฐานการผลิตภายในประเทศ ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบ คุณสมบัติต่างๆของวัสดุ รวมไปถึงกระบวนการผลิต ประเภทเหล็กตามมาตรฐานญี่ปุ่น จะแบ่งตามลักษณะของการใช้งาน โดยตัวอักษรชุดแรกจะมีคำว่า JIS ซึ่งหมายถึง

Japanese Industrial Standard และตัวอักษรถัดมาจะหมายถึงผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อักษร A สำหรับวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรม อักษร B สำหรับวิศวกรรมเครื่องกล อักษร C สำหรับวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า อักษร D สำหรับวิศวกรรมยานยนต์ อักษร E สำหรับ วิศวกรรมรถไฟ อักษร F สำหรับการสร้างเรือ อักษร G สำหรับวัสดุเหล็กและโลหะวิทยา อักษร H สำหรับวัสดุโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะวิทยา อักษร K สำหรับวิศวกรรมเคมี อักษร L สำหรับวิศวกรรมสิ่งทอ อักษร M สำหรับแร่ เป็นต้น ถัดจากตัวอักษรจะเป็นตัวเลขซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 ตัว มีความหมายดังนี้ ตัวเลขตัวแรก หมายถึง กลุ่มประเภทของเหล็ก เช่น 0 สำหรับ เรื่องทั่วไป การทดสอบและกฎต่าง ๆ 1 สำหรับวิธีวิเคราะห์ 2 สำหรับวัตถุดิบ เหล็กดิบ ธาตุประสม 3 สำหรับเหล็กคาร์บอน 4 สำหรับเหล็กกล้าประสม ตัวเลขตัวที่ 2 จะเป็นตัวแยกประเภทของวัสดุในกลุ่มนั้น เช่น ถ้าเป็นไนโตรเจนเหล็ก จะมีดังนี้ 1 สำหรับเหล็กกล้าประสมนิเกิลและโครเมียม 2 สำหรับเหล็กกล้าประสมอลูมิเนียมและโครเมียม 3 สำหรับเหล็กไร้สนิม 4 สำหรับเหล็กเครื่องมือ 8 สำหรับเหล็กสปริง 9 สำหรับเหล็กกล้าทนการกัดกร่อนและความร้อน ตัวเลขที่เหลือ 2 หลักสุดท้ายจะเป็นตัวแยกชนิดของส่วนผสมที่มีอยู่ในวัสดุนั้น เช่น ถ้าเป็นเหล็ก ตัวเลข 2 หลักสุดท้ายจะเป็นตัวแยกชนิดเหล็กตามส่วนผสมธาตุที่มีอยู่ในเหล็กชนิดนั้น ๆ เช่น 01 สำหรับเหล็กเครื่องมือคาร์บอน 03 สำหรับเหล็กไฮสปีด 04 สำหรับเหล็กเครื่องมือประสม

ตารางที่ 2.9 สัญลักษณ์และองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 [10]

Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Ni+Cr
S35C	0.32-0.38	0.15-0.45	0.30-0.70	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S38C	0.35-0.41	0.15-0.46	0.30-0.71	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S40C	0.37-0.43	0.15-0.47	0.30-0.72	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S43C	0.40-0.46	0.15-0.48	0.30-0.73	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S45C	0.42-0.48	0.15-0.49	0.30-0.74	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S48C	0.45-0.51	0.15-0.50	0.30-0.75	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.
S50C	0.47-0.53	0.15-0.51	0.30-0.76	0.030 max.	0.035 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.30 max.	0.35 max.

2.5 การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD)

การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพเป็นกระบวนการสร้างฟิล์มภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อทำให้สารตั้งต้นกลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลขนาดเล็ก จากนั้นอะตอมที่เกิดขึ้นจะตกเคลือบบนชิ้นงาน มีจุดเด่นคือ กระบวนการเคลือบใช้อุณหภูมิต่ำ ใช้แก๊สที่ไม่เป็นพิษ และไม่ซับซ้อน โดยกระบวนการเกิดสร้างผิวเคลือบ มีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอนดังนี้ (Smith, 1995)

1) การสร้างสารเคลือบ สารเคลือบที่สร้างขึ้นอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และไอ แต่ขณะเคลือบ สารเคลือบจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2) ในภาวะสุญญากาศอาจทำให้การเคลื่อนที่ของสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ เดินทางเป็นเส้นตรง

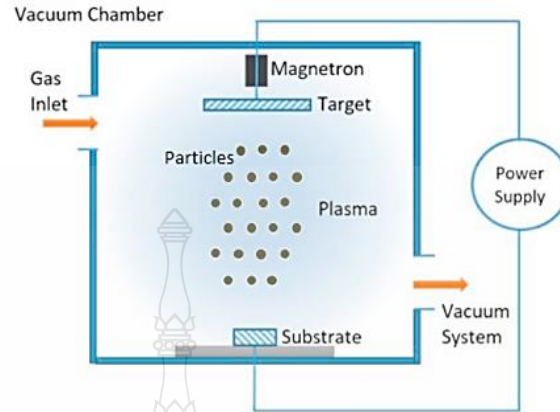
3) การสะสมพอกพูน ขั้นนี้เป็นการควบคุมของสารเคลือบบนผิวของวัสดุรองรับ จากสถานะไอเป็นของแข็ง และสะสมพอกพูนและโตขึ้นเป็นชั้นฟิล์มบาง คุณภาพของชั้นฟิล์มบางจะขึ้นกับพื้นผิวของวัสดุรองรับหรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ และพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

วิธีการทำให้เกิดไอแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

2.5.1 วิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและนิยมใช้ในอุตสาหกรรม จากรูป 2.4 เป้า (target) คือวัสดุที่นำมาเป็นผิวเคลือบ จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟให้เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และชิ้นงานจะวางอยู่บนฐานที่เป็นแอโนด โดยวางหันหน้าเข้าหากัน แก๊สที่ใช้ในการสปัตเตอริง เช่น แก๊สเฉื่อยจะถูกป้อนเข้ามาในเตาสุญญากาศโดยให้ความดันไม่เกิน 100 mtorr ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้า 2-3 กิโลวัตต์ไปยังขั้วแคโทด เมื่ออะตอมของแก๊สเฉื่อยเริ่มแตกตัวเป็นไอออน (+) และอิเล็กตรอน (-) ไอออน จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจนวิ่งไปชนเป้าเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างขั้ว และกระแทกเอาอะตอมหรือไอออน ของวัสดุเคลือบให้หลุดออกมาได้ อะตอมที่ถูกกระแทกออกมาจะได้รับการถ่ายเทพลังงานมาด้วยจึงวิ่งในทิศที่ออกมาจากเป้า บางส่วนที่จะวิ่งไปเกาะที่ผิวชิ้นงานซึ่งหันหน้าเข้าหากัน อะตอมเหล่านี้จะเกาะและทับถมกันบนผิวชิ้นงานจนกลายเป็นผิวเคลือบ

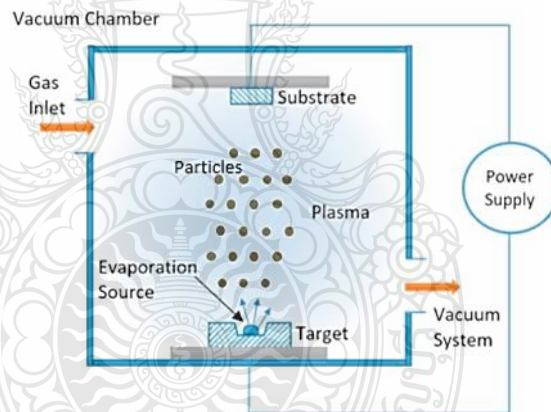
2.5.2 วิธีการระเหย (Evaporation) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนโดยตรงต่อวัสดุเคลือบเพื่อระเหยหรือระเหิดและกลายเป็นไอไปเคลือบผิว ตัวอย่างเช่น กระบวนการ PVD แบบระเหยในสุญญากาศ (Thermal Evaporation PVD) วัสดุเคลือบจะบรรจุอยู่ในอ่างซึ่งมีกวางไว้ใต้ชิ้นงานเพื่อให้ไอระเหยลอยขึ้นไปเคลือบพอดี แล้วจึงให้ความร้อนแก่วัสดุเคลือบ ระหว่างวัสดุเคลือบและชิ้นงานอาจจะมีหน้าต่างเปิด/ปิด (Shutter) เพื่อช่วยควบคุมปริมาณการเคลือบ วิธีให้ความร้อนที่นิยมใช้มากที่สุดเป็นแบบ Resistive heating ด้วยลวดทังสเตนหรือลวดโมลิบดีนัม เป็นต้น ชิ้นงานจะได้รับความร้อนจากบริเวณระเหยจึงอาจมีอุณหภูมิสูงถึง 500 C บางกระบวนการอาจจะใช้ล้ออิเล็กตรอนเป็นแหล่งให้ความร้อนทำให้วัสดุเคลือบหลอมเหลว (Electron-beam evaporation) สามารถหลอมระเหยวัสดุเคลือบได้ค่อนข้างเร็ว จึงมีอัตราการเคลือบที่ดีกว่าให้ความร้อนแบบ Resistive นอกจากนี้แล้วก็มีการใช้ความร้อนแบบ Induction และแบบ Laser evaporation ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมเช่นกัน

PVD Sputtering



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการ PVD Sputtering [11]

PVD Evaporation



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ PVD Evaporation [11]

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของการเคลือบ PVD ทั้ง 2 วิธี [12]

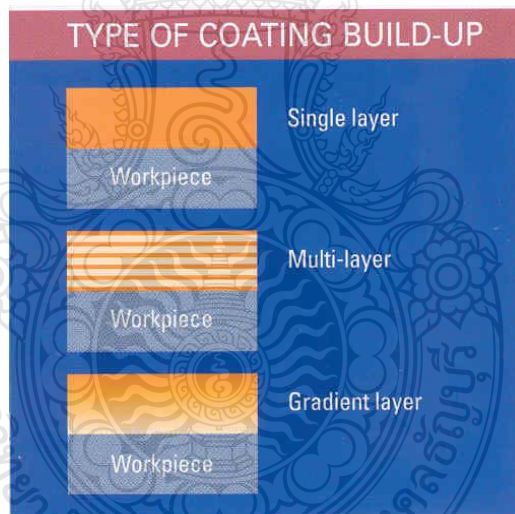
Parameters	Sputtering	Evaporation
Vacuum	Low	High
Deposition rate	Low (except for pure metals and dual magnetron)	High (up to 750,000 A min ⁻¹)
Adhesion	High	Low
Absorption	High	Less absorbed gas into the film
Deposited species energy	High (1–100 eV)	Low (~0.1–0.5 eV)
Homogeneous film	More	Less
Grain size	Smaller	Bigger
Atomized particles	More Dispersed	Highly directional

2.5.3 ประโยชน์ของการชุบเคลือบ และรูปแบบการเคลือบผิว

การนำเทคนิค PVD ไปใช้งานเพื่อต้านทานการสึกหรอ มีความแข็งสูงถึงประมาณ 2500 - 3500 HV ที่ความหนา 1-5 μm เพิ่มความทนทานต่อสารเคมี ลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ผิวเรียบ นำความร้อนต่ำ มีการยึดเกาะของแต่ละชั้นดีเยี่ยมแม้จะใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำ โดยทั่วไปไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส สามารถจำแนกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ผิวเคลือบสำหรับเครื่องมือกลและแม่พิมพ์ (Cutting Tool, die and mould) ผิวเคลือบสำหรับรองลื่น (Bearing) และผิวเคลือบแข็งเพื่อทดแทนผิวเคลือบโครเมียมแข็ง (Hard Chrome) เนื่องจากกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามีปัญหาด้านการจัดการของเสียและสิ่งแวดล้อม สารเคลือบ PVD ที่นิยมใช้ในการต้านทานการสึกหรอ เช่น TiN, TiAlN, TiZrN, CrN, Al_2O_3 เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งสูงมาก และบางกรณีสามารถลดแรงเสียดทานได้ด้วย

รูปแบบการเคลือบผิวบนชิ้นงาน (Type of Coating Build-up) ดังนี้

- 1) ผิวเคลือบชั้นเดียว (Single Layer)
- 2) ผิวเคลือบหลายชั้น (Multi Layer) แต่ละชั้น เคลือบด้วยวัสดุต่างชนิดสลับกัน
- 3) ผิวเคลือบผสม (Gradient Layer) ผิวเคลือบชั้นเดียวแต่วัสดุเคลือบถูกผสมรวมด้วยวัสดุหลายชนิด



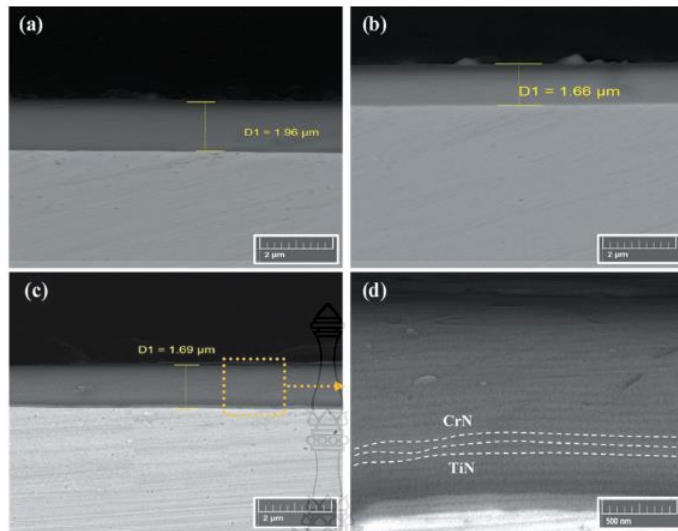
รูปที่ 2.6 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ

SELECTED COATING PROPERTIES						
Coating material	TiN	TiCN	CrN	ZrN	AlTiN	W-C:H
Hardness HK (1N)	2500 ±400	2900 ±400	2300 ±300	2400 ±400	3000 ±400	900 to 1400
Temperature resistance °C	550 ±50	450 ±50	650 ±50	600 ±50	800 ±50	350 ±50
Electr. resistance $\mu\Omega$ cm	60 ±20	8 ±20	640	30 ±10	4000– 7000	– –
Thermal conductivity ($Ws^{0.5}/m^2K$)	8800 ±1000	8100 ±1400	8100 ±2600		7000 ±400	7600 ±1000
Coefficient of friction (100Cr6)	0.65– 0.70	0.40– 0.50	0.50– 0.60	0.50– 0.60	0.55– 0.65	0.15– 0.30
Layer thickness (μm)	2–4	2–4	3–8	2–4	2–4	1–5
Colour	gold- yellow	red-brown/ grey	silver	light gold	anthracite	anthracite/ blue-grey
Ductility	good	satisfactory	very good	good	satisfactory	–

รูปที่ 2.8 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด



รูปที่ 2.9 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ (a) TiN-monolayer, (b) CrN-monolayer, (c) และ (d) TiN/CrN multilayer [13]

2.6 การเคลือบผิวด้วยไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

เป็นการเคลือบฟิล์มบางประเภทหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารเคลือบที่อยู่ในสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะไอ กระทำในตู้เคลือบที่เป็นระบบปิด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอเคมี สามารถเคลือบบนผิวโค้งหรือชิ้นงานขนาดเล็กให้มีความสม่ำเสมอ และมีแรงยึดเกาะสูงได้ การเคลือบผิวแบบ CVD มีข้อดีได้แก่ เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ แต่ความแข็งแรงจะมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัลลอยที่มีเกรนละเอียดถึงละเอียดปานกลาง ค่าความแข็งแรงจะลดลงมากกว่าอัลลอยที่มีเกรนหยาบ สามารถนำไปใช้ในการเคลือบผิวแบบหลายชั้นได้ (Multilayer Coating) เนื่องจากสารเคลือบขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ปล่อยเข้าไป

2.7 การทดสอบสมบัติทางกล

2.7.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength Testing)

การทดสอบการดึง ใช้มาตรฐาน ASTM E8 เป็นการทดสอบสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ง่าย สามารถให้ผลที่เป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐาน ได้แก่ ความเหนียว ความเปราะ ความยืดหยุ่น ความแข็งแรงคราก (Yield strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เสียรูป ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength หรือ Ultimate strength) และอัตราส่วนการหดตัวสัมพันธ์ของหน้าตัด (Poisson Ratio) สมบัติเหล่านี้เป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุ นอกจากนั้นยังสามารถหาการยืดตัวเมื่อแตกหักของวัสดุได้อีกด้วย การทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปจะเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tensile test) รูปแบบการทดสอบแสดงดังรูป 2.10 โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ หากนำขนาดของแรงดึงกล่าวหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงก็จะได้ค่าที่เรียกว่า “ความเค้น (Stress)” ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa ดังสมการ (1) ในขณะที่รับแรงดึงวัสดุ

จะเกิดการเสียรูปโดยยืดตัวออก สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบเรียกว่า “ความเครียด (Strain)” ซึ่งมีหน่วยเป็น m/m หรือไม่มีหน่วย ดังสมการ (2) ความเค้นและความเครียด เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามลำดับดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress)

F คือ แรงภายนอกที่มากระทำ

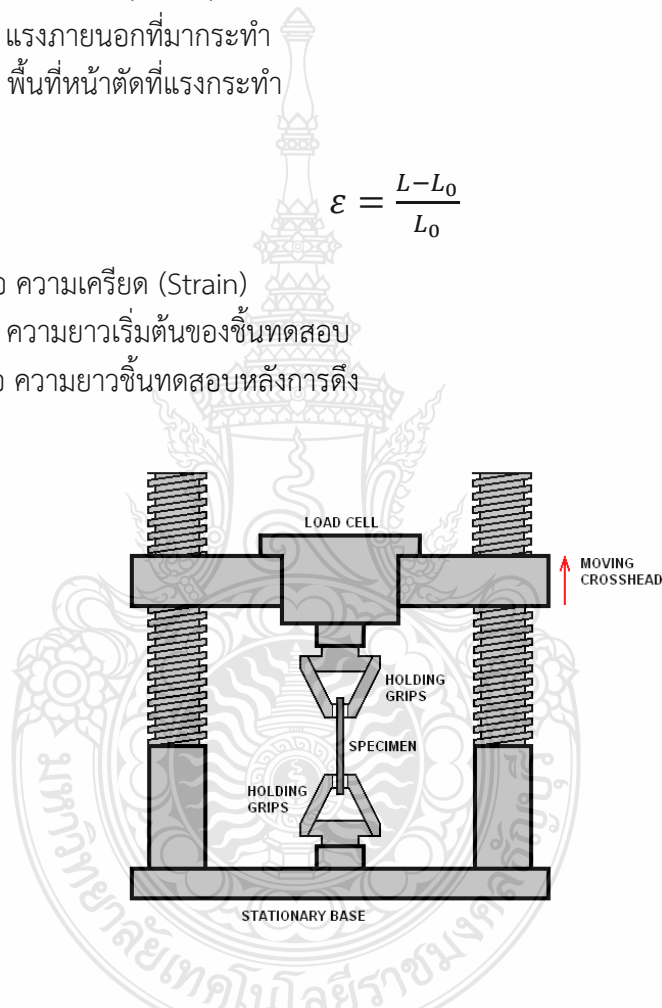
A คือ พื้นที่หน้าตัดที่แรงกระทำ

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (2)$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียด (Strain)

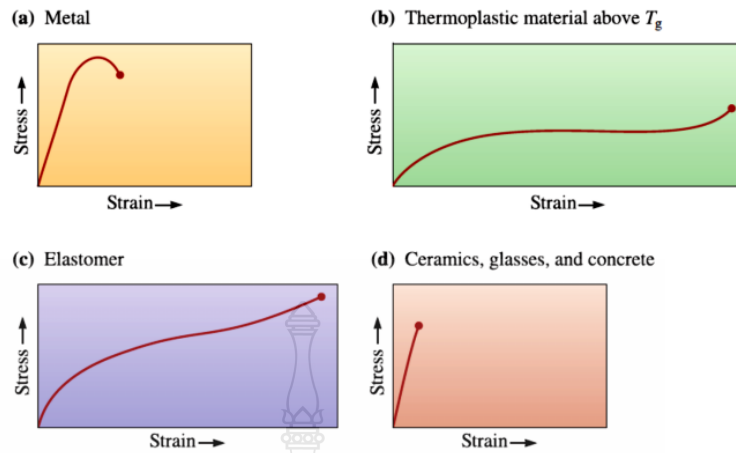
L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

L คือ ความยาวชิ้นทดสอบหลังการดึง



รูปที่ 2.10 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบใช้สกรู หรือไฮดรอลิกส์ [14]

เมื่อทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงและความยาวจากเกจวัด ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาความเค้น-ความเครียดได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดนั้นจะให้ค่าสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าความแข็งแรงจุดคราก ความแข็งแรงสูงสุด หรือความแข็งแรงที่จุดแตกหัก



รูปที่ 2.11 กราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่ต่างกันไป [15]

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) คือค่าความเค้นสูงสุดในกราฟความเค้น-ความเครียด
วิศวกรรม วัสดุเหนียวหลายชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการลดพื้นที่หน้าตัดลงเป็นคอคอด
ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 (ก) การแตกแบบถ้วยและกรวย (Cup and Cone) (ข) การแตกเปราะ (Brittle) [16]

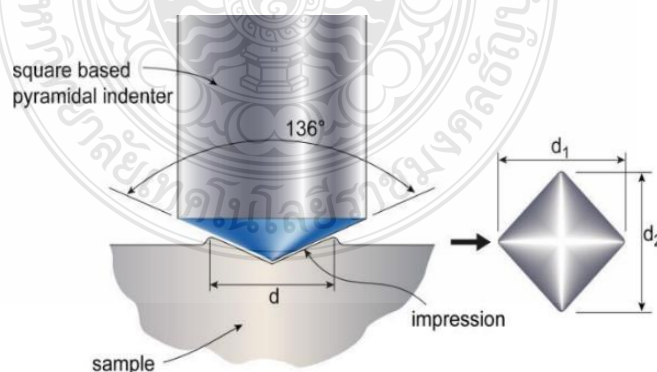
2.7.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี มีวิธีการทดสอบที่หลากหลาย ตั้งแต่การทดสอบอย่างง่าย เช่นการใช้ตะไบเป็นเครื่องมือทดสอบ โดยเลือกตะไบที่มีความแข็งสูงสุด ทำการจัดเรียงลำดับตะไบตามความแข็ง แล้วนำไปทดสอบกับโลหะชนิดต่างๆ ถ้าหากสามารถตะไบโลหะชนิดนั้นได้ แสดงว่าชนิดนั้นมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับตะไบนั้น แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ อาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกวิธีการทดสอบความแข็งด้วยวิธีตามมาตรฐาน ด้วยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ มีช่วงการวัดที่กว้างที่สุด ครอบคลุมความต้องการในการวัดความแข็งทั้งหมด และสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับวัสดุเกือบทุกชนิดได้ด้วย scale เดียว มีความละเอียดสูง ข้อดีที่เหนือกว่าการวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness) อีกประการหนึ่ง คือ ผลการวัดค่าความแข็งคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกด ซึ่งแบบบริเนล จะให้ผลการวัดความแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนแรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด (force-diameter ratio) แบบวิกเกอร์ มีหลักการคล้ายคลึงกับแบบบริเนล คือเป็นการวัดค่าความแข็งโดยออกแรงกดไปยังชิ้นงานผ่านหัวกดเพชรรูปพราמידฐานสี่เหลี่ยม (Square Based Diamond) ที่มีมุมยอด 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบบริเนล แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูง ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่อ่อนมาก (ประมาณ 5 HV) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (ประมาณ 1500 HV) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีค่าตั้งแต่ 1 - 120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM E92 แสดงดังสมการที่ 3

$$HV = \frac{2P \sin(136^\circ / 2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (3)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm²)
P คือ น้ำหนักที่ใช้กด (kgf)
d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d₁ และ d₂ เฉลี่ย (มิลลิเมตร)



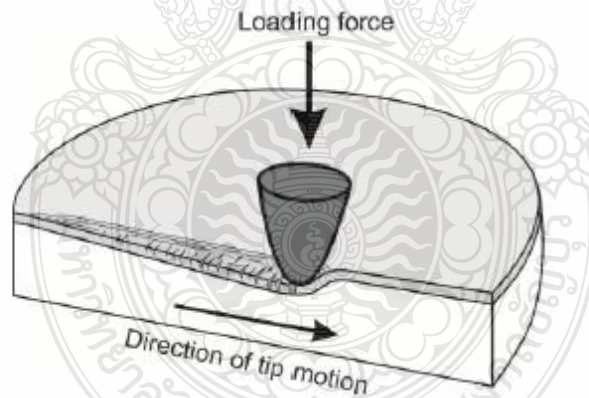
รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [17]

2.7.3 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance testing)

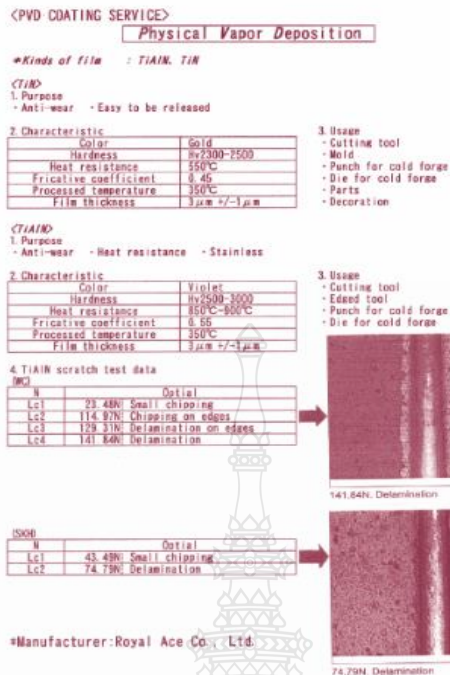
2.7.3.1 การทดสอบความต้านทานรอยขีดข่วน (Scratch test)

ชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวจะถูกลบด้วยหัวเข็มที่ทำจากเพชรลากด้วยความเร็วคงที่และเพิ่มแรงกดขึ้น (Progressive load) ดังรูป 2.14 ในระหว่างการทดสอบนี้ระบบ sensor จะตรวจวัดสัญญาณเสียง (Acoustic emission sensor) ความลึกของหัวเข็มที่เจาะลงไปบนชิ้นงาน (Penetration depth sensor) และค่าความผลที่กำลัเปลี่ยนแปลง (Tangential force sensor) เมื่อถึงแรงกดวิกฤติ (Critical load, L_c) ค่าใดค่าหนึ่งผิวเคลือบจะเริ่มเสียหายจะอยู่ในช่วงกระบวนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยการตรวจจับของ sensor ต่างๆ ผู้วิจัยจะสามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ออกได้หลายระดับ ได้แก่ L_{c1} , L_{c2} และ L_{c3} จนกว่าจะถึงแรงสุดท้ายที่ทำให้ผิวเคลือบเกิดการหลุดลอกอย่างสมบูรณ์ (Complete Delamination) ในงานเคลือบผิวแข็ง ถือว่ามีความสำคัญมาก เครื่องมือทดสอบจะสามารถให้แรงกดสูงสุดได้ 200N แต่ในทางปฏิบัติ มักจะตั้งค่าสูงสุดที่ 120 – 150 N เพื่อป้องกันการเสียหายของหัวเข็มเพชรที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากงานเคลือบผิวแข็งหลายชนิดในปัจจุบันมีความแข็งระดับ super hard (มากกว่า 40 GPa) และมีค่าการยึดเกาะกับพื้นผิวที่สูงมาก

ผลลัพธ์ที่ได้มา เพื่อนำไปวิเคราะห์นั้นได้แก่ลักษณะของร่องที่เกิดขึ้น รอยนูนหรือร่องรอยต่างๆ การเกิดสะเก็ดจากผิว รอยรอยเริ่มต้นของรอยแตก การหลุดลอกของผิวเคลือบ การคืนตัวและการยุบตัวของพื้นผิว ไปจนถึงพฤติกรรมของแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.14 หลักการทั่วไปของ scratch tester [18]



รูปที่ 2.15 รูปผลการทดสอบ Ti/AlN ทดสอบในประเทศไทยญี่ปุ่น

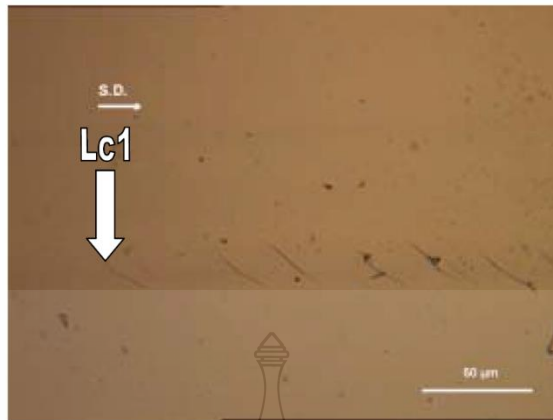
จากรูปที่ 2.15 จะเห็นการแบ่งค่า Lc เป็นระดับต่างๆ โดยที่ค่า complete delamination ของฟิล์มบน Tungsten Carbide (WC) มีค่า 141.84 N และบน SKH steel มีค่า 74.79 N ซึ่งมีค่าสูงมาก ใกล้เคียงกับ coating จากบริษัทชั้นนำในยุโรปและญี่ปุ่น สังเกตว่า coating ชนิดเดียวกัน จากเตาชุบเดียวกัน หากชิ้นงานเป็นวัสดุต่างกัน ค่า adhesion และพฤติกรรมการหลุดลอกจะต่างกันอีกด้วย

ตารางที่ 2.11 ระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ

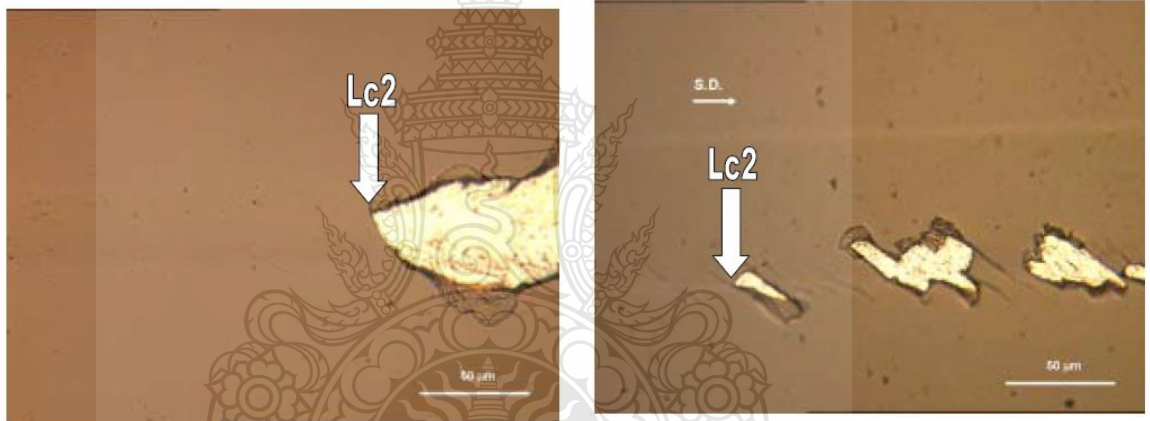
Lc ⁽¹⁾	คำอธิบายความเสียหายในระดับต่างๆ
Lc1	จุดที่ใกล้รอยขีดข่วนแรก โดยเริ่มจากขอบของรอยแตก ดังรูปที่ 2.16
Lc2	จุดที่ฟิล์มเริ่มเกิดการกระเทาะออก ดังรูปที่ 2.17
Lc3	ฟิล์มกระเทาะออกอย่างสมบูรณ์จนถึงพื้นผิวของวัสดุ ดังรูปที่ 2.18

(1) ค่าแรงวิกฤตที่ทำให้เริ่มเกิดรอยขีดข่วนจนผิวเคลือบเกิดความเสียหาย สำหรับฟิล์มที่เกิดความบกพร่อง แสดงดังรูป 2.19

(2) Based on The Scratch Test Atlas of Failure Modes-FASTE



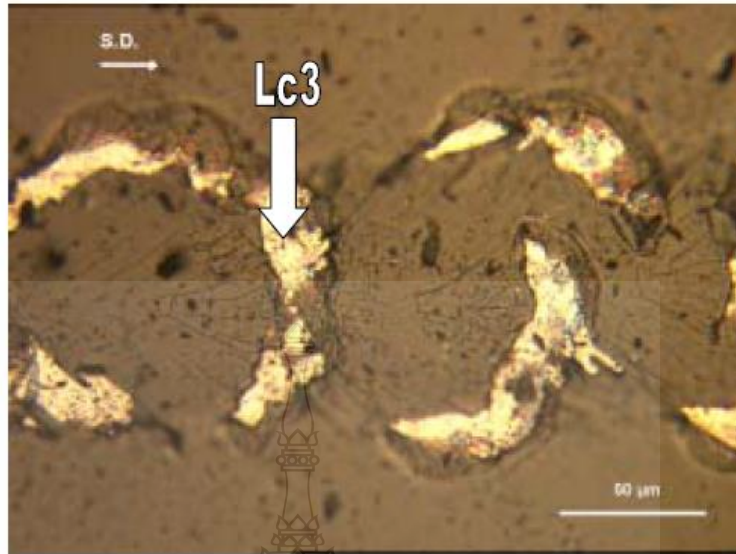
รูปที่ 2.16 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งมีลักษณะรอยขีดแบบ Chevron tracks และ LC1 แสดงจุดเริ่มต้นของทิศทางการเกิดรอยขีดข่วน



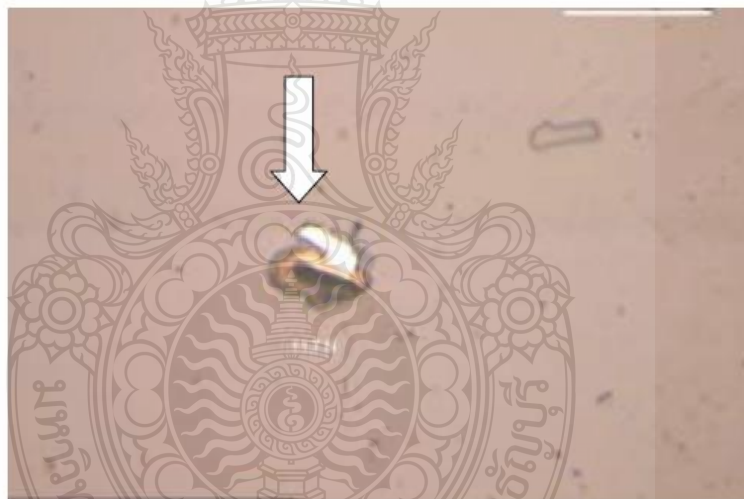
(ก)

(ข)

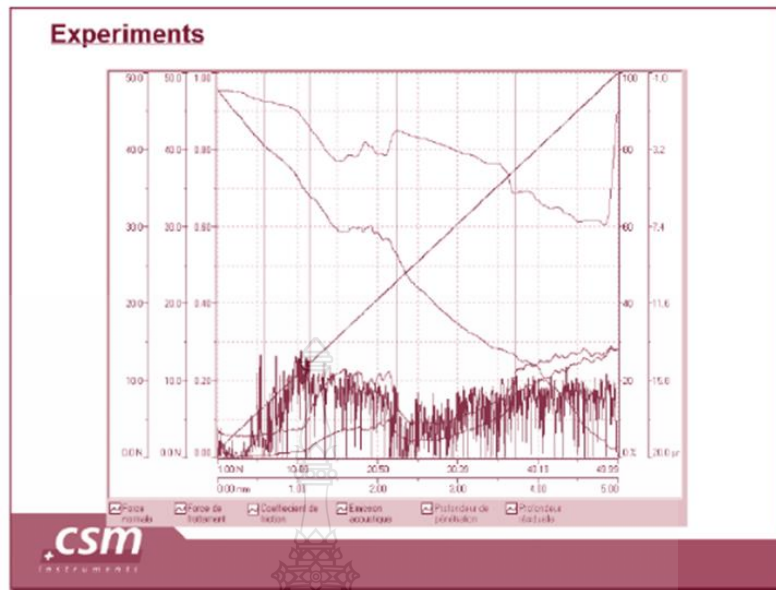
รูปที่ 2.17 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งมีลักษณะรอยขีดแบบ Chevron tracks และ LC2 (ก) local interfacial spallation (ข) gross interfacial spallation



รูปที่ 2.18 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนจนถึงพื้นผิวของวัสดุ และ LC3 วัตจากขอบที่ใกล้ที่กึ่งกลางรอยขีดข่วน

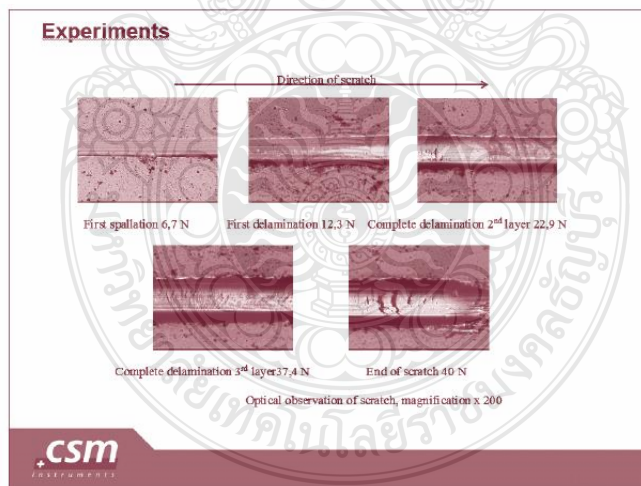


รูปที่ 2.19 รูปจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยขีดข่วนซึ่งลากผ่านไปยังบริเวณที่เกิดความบกพร่องของชิ้นงานอาจส่งผลให้ค่าแรงวิกฤตผิดพลาด



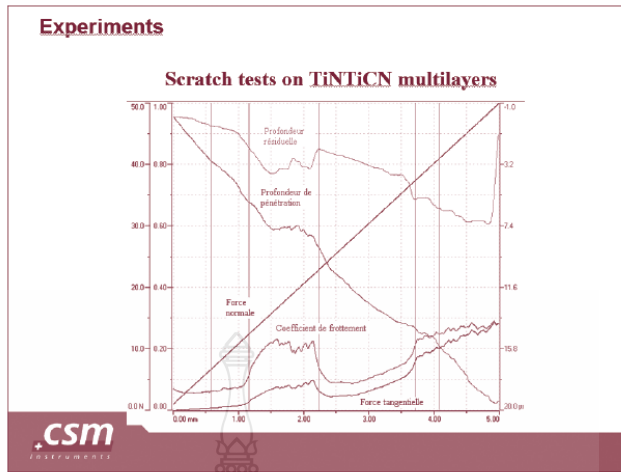
รูปที่ 2.20 แผนภาพที่ได้จาก sensor ในเครื่อง scratch test บนฟลอม TiN/TiCN แบบ multilayer ของผู้ผลิตรายหนึ่งในยุโรป

จากรูป 2.20 เป็นการอธิบายผลโดยใช้สี่ของค่าจาก sensor ต่างๆที่สำคัญ เช่น แรงกดในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุ แรงต้านทานการขีด ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สัญญาณเสียงของการขีด ความลึกของหัวขีดที่จมลงในผิววัสดุ และการคืนตัวของพื้นผิวหลังการขีด



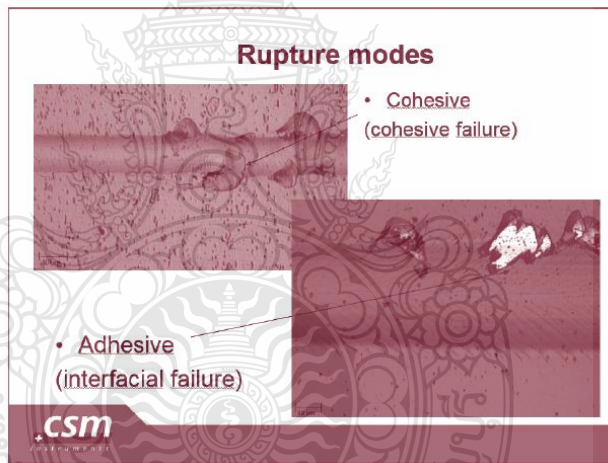
รูปที่ 2.21 แสดงภาพขยายของรอยขีดจากเครื่อง Scratch Test บนฟิล์ม TiN/TiCN multilayer

จากรูป 2.21 เป็นการทดสอบ Scratch Test ของสารเคลือบชนิด TiN และ TiCN แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์แบบในการทดสอบครั้งนี้ จากรูปจะเห็นว่าเทคโนโลยี sensor ในปัจจุบันสามารถทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลได้อย่างแม่นยำ ให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ



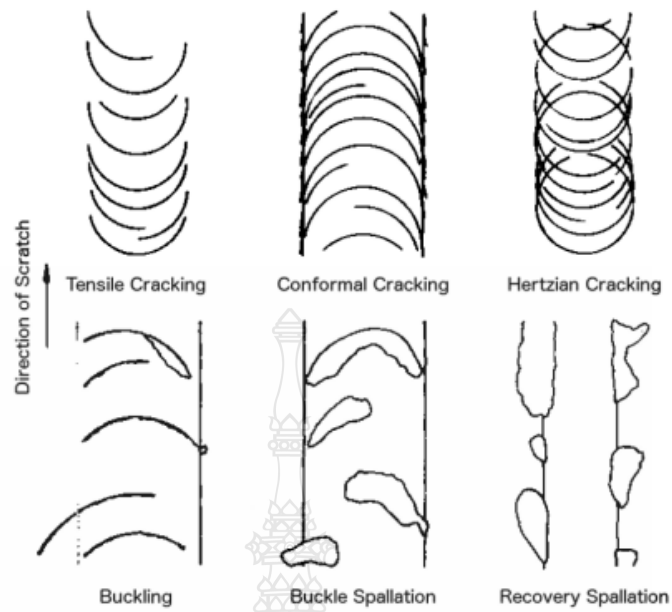
รูปที่ 2.22 พฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของแผนภาพแต่ละเส้น

จากรูป 2.22 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาของการขูดทดสอบ โดยกราฟนี้จะตัดเส้นของ Acoustic emission ออกเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากการแรงการขูดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.23 ภาพขยายของความเสียหายบนฟิล์มผลมาจากการขูดด้วยเครื่อง Scratch test

จากรูปที่ 2.23 ผู้วิจัยสามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายได้ เช่นความเสียหายแบบ cohesive ซึ่งมีผลจากความเสียหายในเนื้อฟิล์ม หรือความเสียหายแบบ adhesive ซึ่งมักเกิดในบริเวณรอยต่อระหว่าง coating กับผิวชิ้นงาน (substrate) ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นสามารถเทียบเคียงได้จากภาพมาตรฐานรอยขีดของผู้ผลิตเครื่องมือทดสอบที่ได้มาตรฐานสากล ดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงภาพจากการขีดด้วยเครื่อง Scratch Test และชื่อเรียกลักษณะรอยขีด [19]



2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mo, J.L., Zhu, M.H. (2009)[20] ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) และ อะลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlTiN) ด้วยการทดสอบแบบ Ball on disk พบว่า เมื่อชั้นเคลือบได้รับแรงกระทำในบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะเกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้น สารประกอบออกไซด์ของไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต่างกัน สำหรับออกไซด์ฟิล์มของอะลูมิเนียมและโครเมียม สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันความร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์ของไทเทเนียมที่เพิ่มการสึกหรอและความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอแบบยึดติด

ปกรณัม ชุมรัมย์ และคณะ (2017)[21] ได้ทำการทดลองปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์เหล็กเครื่องมือ SKD11 โดยทดลองนำไปเคลือบผิวและปรับสภาพด้วย TiC-CVD, TiCN-CVD, TiCN-PVD, VC-TD (Thermal Diffusion) ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบด้วยวิธี Ball on disk ควบคู่กับการตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking Die) ในสถานะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น พบว่าการสึกหรอลดลงเมื่อมีการเคลือบ โดย TiCN-CVD มีอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น เนื่องจากมีความแข็งแรงในการเกาะยึดของฟิล์มบนแม่พิมพ์ได้ดีกว่า สำหรับการทดลองด้วยวิธี Ball-on-disk มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการบ่มตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด

วรพจน์ อ้นกระทอง และคณะ (2018)[22] ศึกษาการใช้วัสดุแม่พิมพ์บ่มขึ้นรูปเหรียญชนิดราคา 2 บาทและเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยกำหนดวัสดุทดลองสำหรับผลิตแม่พิมพ์จำนวน 3 วัสดุ ได้แก่เหล็กกล้าเครื่องมือ KD21, K490 และ W360 และทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยวิธี PVD โดยใช้สารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่ความหนาของสารเคลือบประมาณ 2.5-3 μm ผลการทดลองพบว่าวัสดุ W360 มีอายุการใช้งานมากกว่า วัสดุ KD21 และ W360 และวัสดุที่เคลือบด้วยโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะมีความสึกหรอน้อยกว่าไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)

Sulaiman และคณะ (2019)[23] ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 นำมาชุบแข็งที่ 60 HRC จากนั้นทำปรับความเรียบผิวของชิ้นงานและเคลือบด้วยสารเคลือบ TiN, TiCN และ DLC/TiAlN (Double layer) ความหนา 4 ไมโครเมตร ผลการทดสอบความแข็งหลังเคลือบพบว่า TiN มีความแข็งน้อยที่สุด (2000 HV) ส่วน DLC/TiAlN และ TiCN มีความแข็งใกล้เคียงกัน (3000 HV) นำไปทดสอบการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G31 พบว่า DLC/TiAlN เกิดการกัดกร่อน 36.58 มิลลิเมตร/ปี TiCN เกิดการกัดกร่อน 96.86 มิลลิเมตร/ปี TiN เกิดการกัดกร่อน 42.10 มิลลิเมตร/ปี และตัวอย่างที่ไม่มีการเคลือบผิวเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด 140.61 มิลลิเมตร/ปี

Akeem Yusuf Adesina และคณะ (2019)[24] ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกกร่อนของโลหะแผ่น stainless steel 304 ที่ใช้สารเคลือบ TiN CrN AlTiN และ AlCrN ด้วยวิธี Cathodic Arc PVD พบว่าสารเคลือบสองส่วนผสมจะยึดเกาะบนวัสดุได้ดีกว่าสามส่วนผสม และสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ $CrN > TiN > Al_{0.68}Cr_{0.32}N > Al_{0.50}Ti_{0.50}N$ เมื่อทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของ AlTiN มีค่าสูงที่สุด ในขณะที่ CrN มีค่าต่ำที่สุด สำหรับสารเคลือบ 3 ส่วนผสมจะมีค่าความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่า 2 ส่วนผสม เนื่องจากเกิดการสึกกร่อนแบบขีดสี และการสึกกร่อนแบบยึดติด ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีความต้านทานการสึกกร่อนที่ดีขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณส่วนประกอบของธาตุอะลูมิเนียมที่สูง จะทำให้มีความต้านทานการสึกกร่อนที่ต่ำลงได้

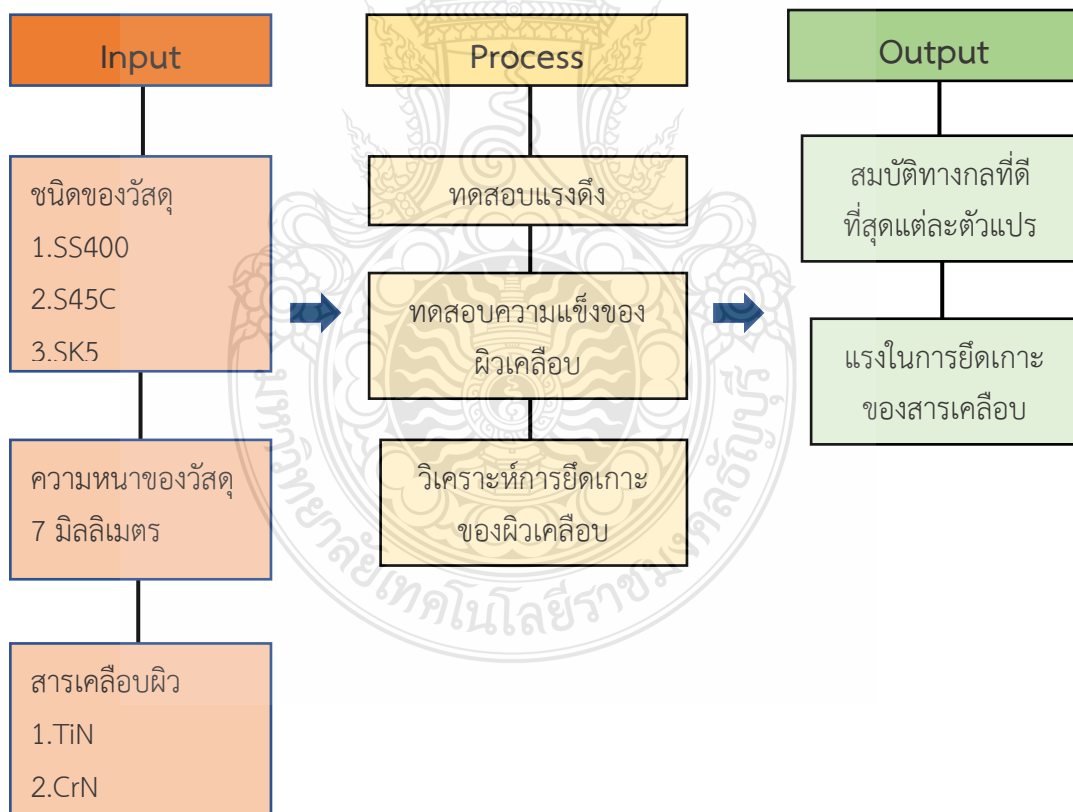
Chunsong Guan และคณะ (2021) [25] ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกกร่อนของสารเคลือบผิวที่เคลือบบนใบมีดโรตารีพรวนดิน ด้วยวัสดุเคลือบผิวทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ TiAlN และ CrN ด้วยวิธี PVD, PTFE ด้วย electrostatic spraying และ Ni-PPTFE ด้วยวิธี electroless composite plating ซึ่งเคลือบวัสดุใบมีดชนิด Q235 เมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล และความต้านทานการสึกกร่อน พบว่า ใบมีดที่เคลือบด้วย TiAlN และ CrN มีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่า PTFE และ Ni-PPTFE เนื่องจากเป็นคุณสมบัติของวัสดุกลุ่มโลหะ แต่วัสดุกลุ่มโพลีเมอร์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่า เนื่องจากวัสดุกลุ่มโลหะจะเกิดออกไซด์ที่พื้นผิว ทำให้มีแนวโน้มเกิดแรงเสียดทานที่พื้นผิวของวัสดุได้สูงกว่า เมื่อทำการทดสอบภาคสนามพบว่า Ni-P-PTFE มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด เนื่องจากพื้นผิวของสารเคลือบมีความเรียบที่พื้นผิวทำให้เกิดกลไก Self-locking จึงเกิดการสึกกร่อนที่ต่ำและยังมีราคาต้นทุนการเคลือบต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นด้วย

เฉลิม ขุนเอียด และคณะ (2021) [26] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของชิ้นส่วนรถตักดิน ซึ่งเป็นวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย TiCN + Al₂O₃ และ TiCN ด้วยกระบวนการ CVD และ PVD พบว่า เมื่อทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส วัสดุที่เคลือบ TiCN CVD และ PVD ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีจากกราฟจะพบว่า เครื่องมือที่เคลือบ TiCN ด้วย PVD มีความเหมาะสมในการเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานได้ดีกว่าการเคลือบด้วย CVD สมบัติทางไทรบอโลยี TiCN+Al₂O₃ (CVD) ให้ผลการทดสอบดีที่สุดรองลงมาคือ TiCN (PVD) และ TiCN (CVD) ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวีธีการดำเนินงานในบทนี้จะกล่าวถึงสาระสำคัญของวิธีดำเนินการวิจัย โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนการเลือกวัสดุตัวอย่างที่ใช้เป็นไบเมทัลโรตารีพรอนติน โดยวัสดุตัวอย่างที่ทดลองเป็น 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เหล็กกล้าคาร์บอน S45C และเหล็กกล้าคาร์บอน SK5 ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาไบเมทัลจากเดิมที่เกษตรกรใช้งานกันในปัจจุบัน โดยใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) โดยแต่ละตัวแปรจะทำการทดสอบขึ้นรูปเป็นแผ่นตัวอย่างขนาด 7 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและการสึกหรอของสารเคลือบผิว เพื่อเลือกวัสดุและสารเคลือบผิวที่เหมาะสมที่สุด มาเปรียบเทียบกับไบเมทัลที่กำหนดในท้องตลาด โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้



ทำการเก็บตัวอย่างใบมีดโรตารีพรวนดินที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมาวิเคราะห์ในเบื้องต้น โดยนำตัวอย่างใบมีดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ดังรูปที่ 3.1 มาทำการตัดเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ และขัดเปิดผิวหน้าเพื่อนำสเปกโตรมิเตอร์ไปทดสอบส่วนผสมทางเคมีและการทดสอบความแข็ง ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ค่าความแข็งที่ผิวขอบใบมีด มีค่า 41.22 – 47.18 HRC หรือประมาณ 393 – 474 HV ซึ่งเป็นความแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว และผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีพบว่า ชิ้นงานตัวอย่าง มีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็ก S45C ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ใบมีดพรวนดินชนิดตัวซี



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างใบมีดพรวนดินชนิดตัวซี

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของตัวอย่างใบมีดโรตารีพรวนดินในท้องตลาด (wt%)

Chemical Composition (%)								
ตัวอย่าง	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
ใบมีดพรวนดิน	0.53	0.84	0.01	0.02	0.06	0.03	0.21	0.01

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของใบมีดจอบหมุนชนิดตัวชี้ในท้องตลาด

ความหนาจากด้ามถึงปลาย (มม.)	8 - 5
ความกว้างที่ด้ามและที่ปลายมีด (มม.)	22 - 55
องศาการตัด	130
รัศมีการตัด (มม.)	50
ความหนาของใบมีด (มม.)	7
ค่าความแข็ง (HV)	393 - 474

3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

3.1.1 การเลือกชนิดวัสดุที่ใช้ในการผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุในการผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานในครั้งนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SK5 ซึ่งวัสดุที่เลือกมาทดลองเป็นโลหะจำพวกเหล็กที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป และนิยมใช้งานในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า (wt%)

เกรด	Chemical Composition (%)							
	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
ตัวอย่างใบมีด	0.53	0.84	0.01	0.02	0.06	0.03	0.21	0.01
SS400	0.18-0.23	0.30-0.60	< 0.04	< 0.05	-	-	-	-
S45C	0.42-0.48	0.60-0.90	< 0.03	< 0.035	-	-	-	-
SK5	0.80-0.90	< 0.50	< 0.03	< 0.03	-	-	-	-

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสามชนิดในสภาพจำหน่าย

Type	SS400	S45C	SK5
Tensile strength (MPa)	400 - 510	686	1158
Yield strength (MPa)	205 - 245	490	1034
Young's Modulus (GPa)	190 - 210	205	190 - 210
%Elongation	17 - 21	17	15
Hardness (HB)	160	201 - 269	335

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเคลือบผิว

1) เตรียมชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิดได้แก่เหล็ก SS400, S45C และ SK5 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มิลลิเมตร หนา 7 มิลลิเมตร ทำการเจาะรูบริเวณขอบของชิ้นงาน สำหรับแฉวนเข้าห้องชุบ PVD จากนั้นนำมาขัดผิวหน้าด้วยเครื่องขัดผิวแบบล้อผ้า ดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้ชิ้นงานมีความมันเงา เมื่อขัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะได้ชิ้นงานดังรูป 3.4 ข) หากยังไม่ได้ทำการเคลือบในทันที จะต้องทาน้ำมันเคลือบกันสนิมบนผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อให้ผิวชิ้นงานไม่เกิดออกไซด์



รูปที่ 3.3 เครื่องขัดผิวแบบล้อผ้า



รูปที่ 3.4 (ก) รูปชิ้นงานก่อนขัด (ข) รูปชิ้นงานหลังขัด

2) กระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ก) นำชิ้นทดสอบมาเช็ดน้ำมันเคลือบกันสนิม และทำความสะอาดโดยการแช่ล้างด้วย อะซิโตน

ข) นำชิ้นงานไปล้างทำความสะอาดตามขั้นตอน ในถึงน้ำยาเคมีด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 2 ขั้นตอน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการกรองในระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) 3 ขั้นตอน ดังรูป 3.5 จากนั้นเป่าไล่หยดน้ำด้วยแก๊สไนโตรเจน ดังรูป 3.6 และอบเพื่อกำจัดความชื้นที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.6 การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแก๊สไนโตรเจน

ค) ก่อนนำมาบรรจุในอุปกรณ์ติดตั้งชิ้นงาน ต้องทำความสะอาดบริเวณของประตู่ห้องชุบด้วยเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้งก่อนปิดประตูห้องชุบ จากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบเคลือบผิว

3) รายละเอียดกระบวนการชุบเคลือบผิวมีดังนี้

ก) เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวประมาณ 4 ชั่วโมง ระดับความหนาเฉลี่ย 3 ไมครอน

ข) อุณหภูมิที่ใช้เคลือบผิวประมาณ 400-450 °C

ค) ไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Nitrogen 99.999%) ปริมาณที่ใช้ 500 ลบ.ซ.ม ต่อนาที

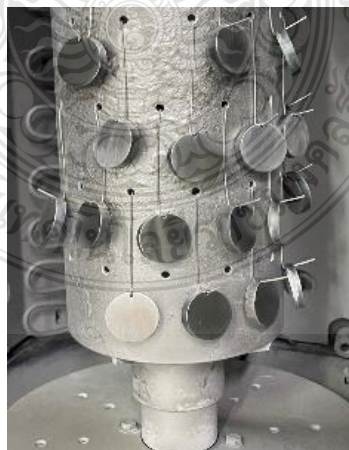
ง) อาร์กอนบริสุทธิ์ (Argon 99.999%) ปริมาณที่ใช้ 300 ลบ.ซ.ม ต่อนาที

จ) ตรวจสอบแท่งคาโทดให้มีความสมบูรณ์ ไม่มีการสึกหรอ

ฉ) บรรจุชิ้นงานเข้าห้องชุบ



รูปที่ 3.7 (ก) Cr Cathode (ข) Ti Cathode



รูปที่ 3.8 การบรรจุชิ้นงานภายในห้องชุบ

ข) ปรับปรุงโปรแกรมให้เหมาะสมกับชนิดของสารเคลือบที่ใช้ และเริ่มกระบวนการเคลือบผิวด้วยเครื่องชุบเคลือบผิวเชิงระบบ PVD ยี่ห้อ SULZER METAPLAS IONON รุ่น MZR 303 (Operating Manual PVD Coating System MZR-303) โดยการใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN)



รูปที่ 3.9 เครื่องชุบเคลือบผิว



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังชุบเคลือบผิว (ก) โครเมียมไนไตรด์ (ข) ไทเทเนียมไนไตรด์

3.1.3 การตรวจสอบความหนาของสารเคลือบ

- ก) ทำการสอบเทียบชิ้นงานด้วยขั้นตอนสอบผิวเคลือบมาตรฐานจากบริษัทผู้ผลิต
- ข) กระแสที่ใช้ในการวัด 50 kV
- ค) เวลาที่ใช้ในการวัด 45 วินาที ต่อ 1 จุด
- ง) วัด 5 จุด ต่อ ชิ้นงาน 1 ชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Fischerscope X-Ray Model, XDV-SDD

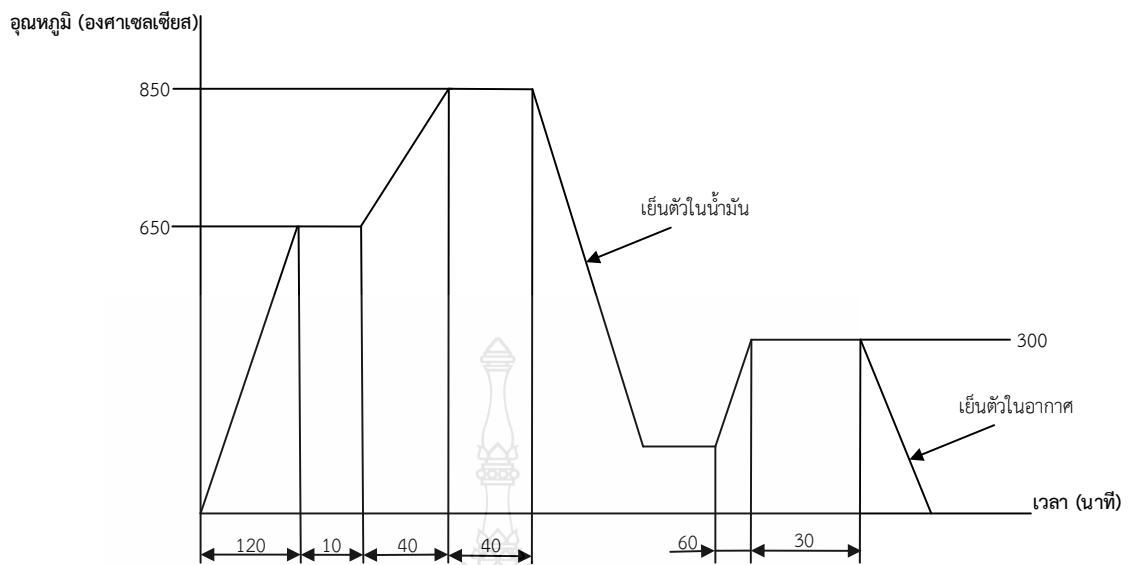


รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.2 อิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของไบเมตโรตารีพรวนดิน

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิดได้แก่เหล็ก SS400, S45C และ SK5 โดยการนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วัสดุที่นำมาใช้ทำไบเมตพรวนดิน ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยนำวัสดุไปทำการชุบแข็ง และทำการอบคืนตัวให้กับวัสดุที่จะนำมาทำไบเมตพรวนดิน เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ และคลายความเครียดภายในเนื้อโลหะหลังทำการชุบแข็งเพราะกระบวนการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อะตอมของโลหะจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้เกิดความเครียดภายในเนื้อโลหะ และการอบคืนตัว จะทำให้โลหะแข็งแรง และรับแรงต่างๆ ได้มากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลมากนัก เช่น ค่าความแข็งแรงดึง หรือ ความแข็ง ดังนั้นก่อนที่จะนำวัสดุไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ต้องทำการอบชุบ และทำการอบคืนตัวให้กับวัสดุก่อน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบคือ 850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัวคือ 300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.12



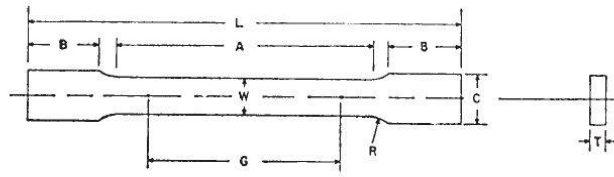
รูปที่ 3.12 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ และอบคืนตัวของวัสดุที่จะมาทำใบมีดพรวนดิน

3.2.2 การทดสอบแรงดึง

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแรงดึง เพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง R_m (Tensile Strength) ความเค้นคราก R_e (Yield Stress) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว A (Elongation) ของวัสดุ เป็นต้น ในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยในขณะทำการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องบันทึก

ในการทดสอบแรงดึง ก่อนอื่นชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทำรอย โดยการขีดหรือตอกด้วยเหล็กนำศูนย์ เพื่อกำหนดความยาวพิกัด G ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดบริเวณปลายทั้งสองข้างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องทดสอบจะค่อยๆ ดึงชิ้นทดสอบช้าๆ ขณะที่ทำการดึงเครื่องจะทำการบันทึกเส้นโค้ง แรงดึง F - ระยะยืด L ในช่วงแรกเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันสูง โดยระยะยืดมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดึง ซึ่งในช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงชิ้นงานทดสอบจะหดกลับไปยังความยาวเดิม จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อจุดที่แรงเริ่มตกลงนี้เรียกว่าแรงที่จุดคราก F_e (Yield Point) ในขณะที่ชิ้นทดสอบยังคงยืดตัวต่อไปจนกระทั่งแรงดึงเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่คราวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งความชันลดลงเรื่อยๆ ช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงจะพบว่าชิ้นทดสอบมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดตัวถาวร (Plastic) เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงต่อไปอีกจะพบว่าแรงดึงจะเริ่มลดลง และถ้าสังเกตที่ชิ้นทดสอบจะพบว่าชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคอดลง ซึ่งจุดที่คอดนี้คือจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน แรงสูงสุด F_m และแรงที่จุดคราก F_e จะถูกนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึง R_m (Tensile Strength) และค่าความเค้นคราก R_e (Yield Stress)

E 8M - 04



Nominal Width	Dimensions, mm		
	Plate-Type 40 mm	Standard Specimens Sheet-Type 12.5 mm	Subsize Specimen 6 mm
G— Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W— Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T— Thickness (Note 5)		thickness of material	
R— Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L— Overall length, (Note 2, Note 7 and Note 8)	450	200	100
A— Length of reduced section, min	225	57	32
B— Length of grip section, (Note 8)	75	50	30
C— Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

รูปที่ 3.13 ลักษณะชิ้นงานและขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด

3.2.3 การทดสอบความแข็งผิวเคลือบ (Hardness Test)

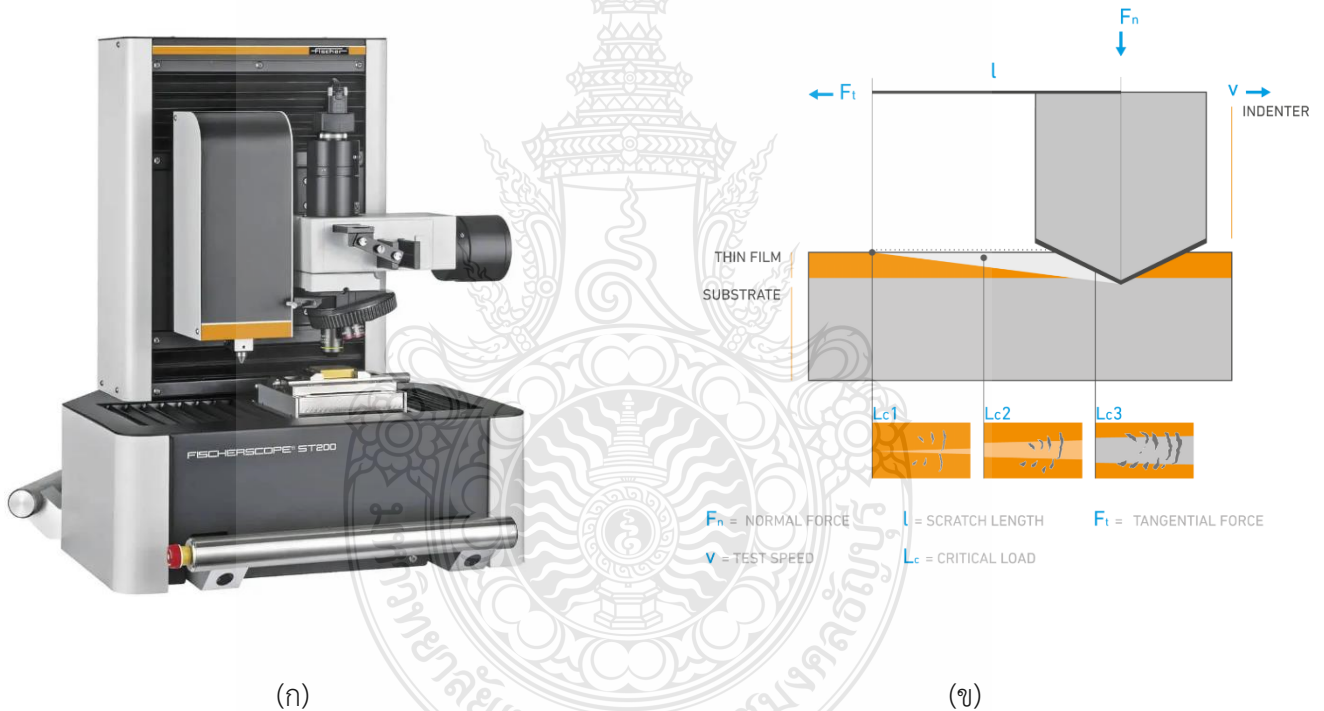
เนื่องจากผิวเคลือบที่ทำการศึกษามีความหนาน้อยมาก ซึ่งจากการวัดความหนาของฟิล์มแล้ว มีความหนาไม่เกิน 3 μm ดังนั้น ในการวัดค่าความแข็งของผิวเคลือบ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง โดยผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือวัดสมบัติทางกลของวัสดุในระดับนาโน (Nano-mechanical testing instrument) ด้วยเครื่องทดสอบ Fisherscope HM2000 ดังรูป 3.14 ใช้แรงกดทดสอบ 20 mN กดที่ชิ้นงานเป็นเวลา 15 วินาที ทำการกดทดสอบแบบสุ่มจำนวน 3 จุดต่อ 1 ตัวอย่างโดยใช้มาตรฐานการทดสอบ JIS Z2244



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน

3.2.4 การทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน (Scratch Test)

การทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วนเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว ทดสอบด้วยเครื่อง Fischerscope ST200 ดังรูป 3.15 (ก) ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องดังกล่าวในการทดสอบ พฤติกรรมทางไดรบบอลิยระดับนาโน (Nano-tribology) เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฟิล์มแข็ง ในการยึดเกาะกับผิวของวัสดุที่ถูกเคลือบ (Sunstrate) โดยหลักการคือผิวเคลือบจะถูกหัวกดเพชรที่มี ปลายมน กดลงบนพื้นผิวที่กำลังทดสอบ โดยแรงจะเพิ่มขึ้นในเชิงเส้น ตั้งแต่ 0.5 – 75 นิวตัน ในขณะที่ ตัวอย่างถูกเคลื่อนไปข้างใต้ด้วยความเร็วคงที่ หัวกดจะทิ้งรอยขีดข่วนไว้ แต่เมื่อแรงเพิ่มขึ้นความเค้นของ วัสดุจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดแตกหัก เครื่องจะบันทึกค่าแรงวิกฤต (Critical load, L_c) และ รูปแบบ ของรอยแตก จากจุดที่เริ่มมีการแตกถึงจุดที่พบรอยแตกอย่างสมบูรณ์ คือสารเคลือบมีการหลุดลอกออก



รูปที่ 3.15 (ก) เครื่องทดสอบ Scratch Test (ข) แรงกระทำวิกฤตในช่วงต่างๆ

3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิต (Cost of Production) คือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตสินค้าและบริการ ซึ่งเป็นตัวเงินและไม่ใช่ตัวเงินซึ่งผู้ผลิตจ่ายออกไปเพื่อให้ได้มาซึ่งสินค้าและบริการที่ต้องการ ต้นทุนทางบัญชีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก) ต้นทุนทางตรง (Direct Cost) หมายถึง ต้นทุนสำหรับค่าจ้างแรงงาน ค่าซ่อมแซมเครื่องจักร วัตถุดิบในการผลิต ค่าเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร

ข) ต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost) หมายถึง ต้นทุนที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรหรือปัจจัยการผลิต ไม่ได้จ่ายเป็นเงินสดให้กับบุคคลอื่น เป็นต้นทุนแฝงในการผลิต เช่น ค่าแรงงานของเจ้าของกิจการ การใช้บ้านเป็นสถานที่ในการผลิตสินค้าและบริการ



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในกระบวนการทดลองของงานวิจัยฉบับนี้ ต้องการศึกษาอิทธิพลการสารเคลือบผิวที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของไบเมทัลโรตารีพรวนดิน กำหนดให้ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ เหล็กกล้าคาร์บอน 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S45C และ SK5 ความหนา 7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร โดยทำการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ ด้วยสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ดำเนินการเก็บข้อมูลการทดลองจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ สำหรับการวิเคราะห์ผลการวิจัย ซึ่งสามารถแยกผลการทดลองออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

4.1.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM

Chemical Composition (%)									
เกรด	AISI	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SS400	1020	0.10-0.20	0.30-0.60	< 0.04	< 0.05	-	-	-	-
S45C	1045	0.20-0.50	0.60-0.90	< 0.03	< 0.035	-	-	-	-
SK5	1085	0.50-1.00	< 0.50	< 0.03	< 0.03	-	-	-	-

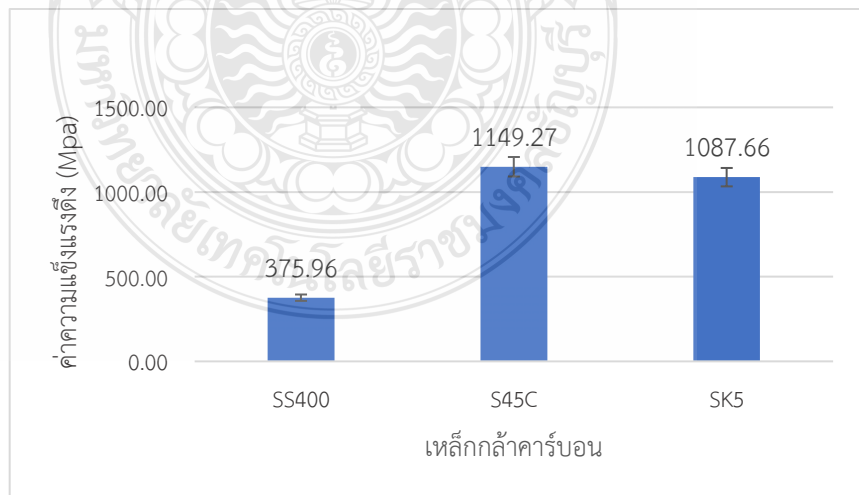
จากตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของสถาบันเหล็กกล้าของสหรัฐอเมริกา ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 4.2 เป็นไปตามมาตรฐานของเหล็กกล้า โดยมีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆอยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งไบเมทัลโรตารีพรวนดินที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเกรด S45C

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการทดสอบ

เกรด	Chemical Composition (%)								
	C	Mn	P	Al	Ni	S	Si	Cr	W
โบมิตทองตลาด	0.53	0.84	0.01	-	0.03	0.02	-	0.21	-
SS400	0.13	0.43	0.02	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03
S45C	0.37	0.62	0.02	0.01	0.06	0.02	0.23	0.12	0.03
SK5	0.73	0.38	0.02	0.02	0.02	0.01	0.18	0.15	0.03

4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอน

ผลการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ถูกอบชุบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานไปตัดให้เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing-Machine) จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นงานนั้น พบว่าการแตกหักของชิ้นงานจะขาดบริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบทุกการทดลอง โดย SS400 มีค่าการทดสอบแรงดึง อยู่ระหว่าง 27.30 – 27.42 kN ซึ่งต่ำกว่า S45C มีค่าการทดสอบแรงดึง อยู่ระหว่าง 81.80 – 88.71 kN ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เฉลี่ยของเหล็ก SS400 S45C และ SK5 มีค่าเฉลี่ย 375.96 MPa 1149.82 MPa และ 1087.66 MPa ตามลำดับ สำหรับความต้านทานความแข็งแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ของเหล็ก SS400 S45C และ SK5 มีค่าเฉลี่ย 248.28 MPa 1160.03 MPa และ 1085.34 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนของวัสดุ SS400 S45C และ SK5

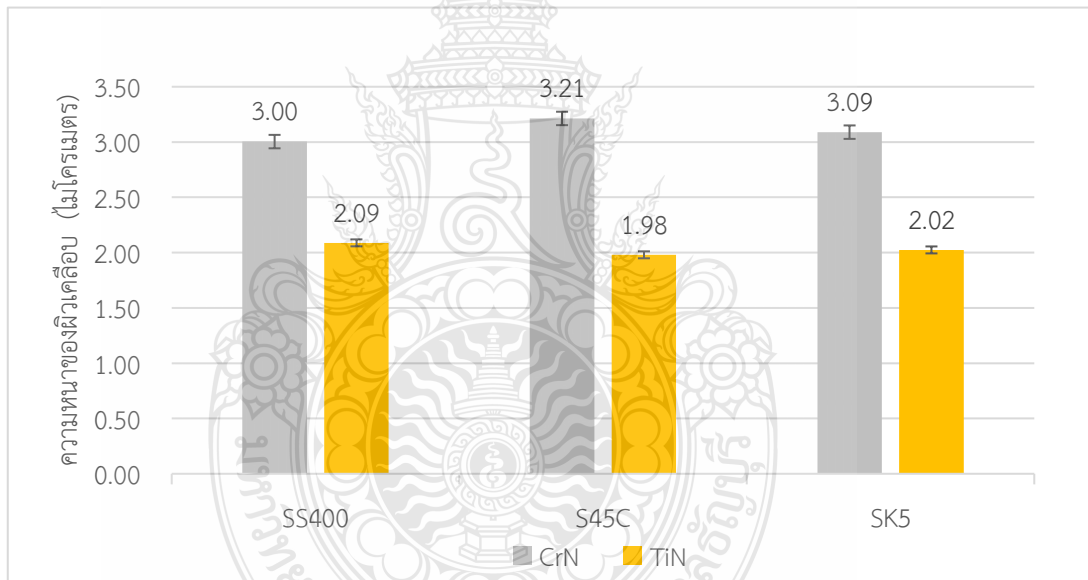
4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของชนิดสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน

สารเคลือบที่ผู้วิจัยเลือกศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ CrN และ TiN ซึ่งพิจารณาเลือกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรม เป็นสารเคลือบที่มีใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบผิวโลหะและมีผู้ให้บริการเคลือบผิวอย่างแพร่หลาย

4.2.1 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบ

เพื่อเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบบนเหล็กกล้าเครื่องมือ SS400 SK5 และ S45C ซึ่งวิเคราะห์โดยคำนวณจากการวัดความหนาผิวเคลือบจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำการวัดตัวอย่างละ 5 จุด ผลการวัดความหนาของผิวเคลือบพบว่า SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบผิวด้วย CrN และ TiN สำหรับ CrN มีความหนาเฉลี่ย 3 ไมโครเมตร และ TiN มีความหนาเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่

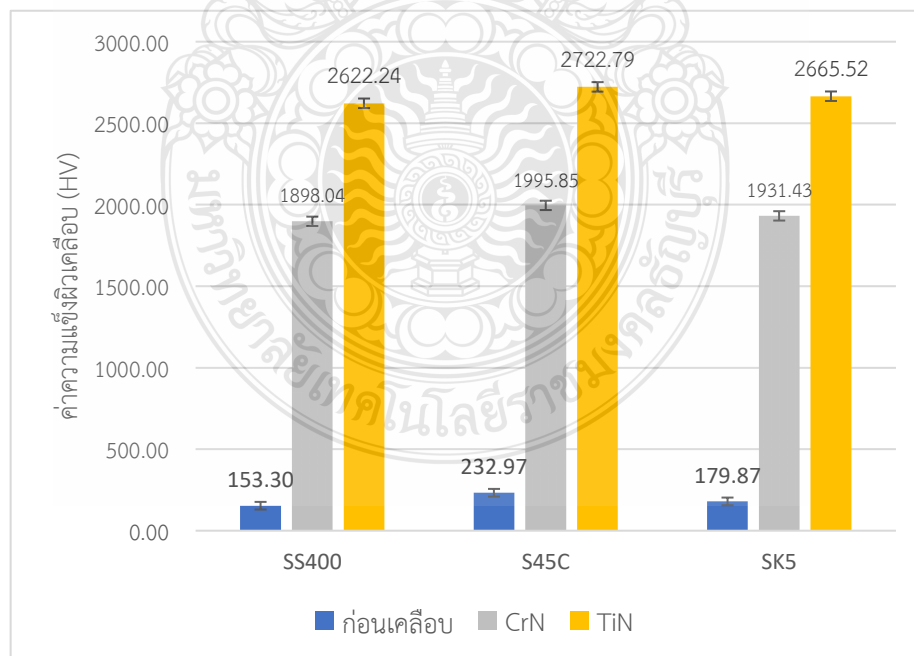
4.2



รูปที่ 4.2 ความหนาของผิวเคลือบ (ไมโครเมตร)

4.2.2 ผลการวัดความแข็งของผิวเคลือบ

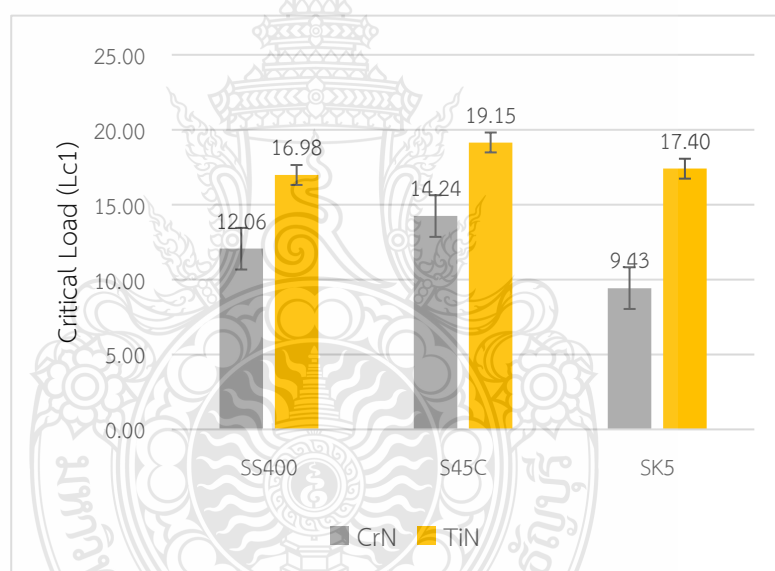
จากการนำตัวอย่างตัวอย่างใบมีดโรตารีพรวนดินในท้องตลาดมาทดสอบความแข็งพบว่า ค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 393 – 474 HV ซึ่งอาจผ่านกระบวนการชุบแข็งและปรับสภาพผิว เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของใบมีด ให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.3 เหล็ก SS400 S45C และ SK5 ในสภาวะจำหน่ายจะมีความแข็งต่ำกว่าใบมีดตามท้องตลาด เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เหล็กตัวอย่างผ่านกระบวนการชุบแข็งเพียงอย่างเดียว จากนั้นนำตัวอย่างเหล็กทั้งสามชนิดมาเคลือบด้วยไอระเหยทางกายภาพ ด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN ในการดำเนินการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ ทำการทดสอบใช้แรงกดที่ผิวของสารเคลือบ 20 ไมโครนิวตัน เป็นเวลา 15 วินาที จำนวน 3 ครั้งต่อตัวอย่าง (ทดสอบโดยบริษัท HELMUT FISCHER) เมื่อพิจารณาอิทธิพลค่าความแข็งของผิวเคลือบ จะพบว่า วัสดุที่เคลือบด้วย TiN มีความแข็งสูงกว่า CrN โดยมีความแข็งสูงสุดประมาณ 2,722.79 HV เมื่อความแข็งของผิวเคลือบมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งสูง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าวัสดุที่อ่อนกว่า เมื่อความแข็งที่ผิวมีค่ามาก ทำให้มีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนรูปถาวรมีค่ามากขึ้น ขนาดของพื้นที่สัมผัสเมื่อวัสดุเปลี่ยนรูปจึงมีค่าน้อย แรงเสียดทานจึงน้อยลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงนั่นเอง เมื่อพิจารณาจากฟิล์มแข็งที่เคลือบบนวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S45C และ SK5 จะพบว่า TiN มีค่าความแข็งสูงกว่า CrN จึงทำให้เกิดการสึกหรอน้อยส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือเพิ่มมากขึ้น



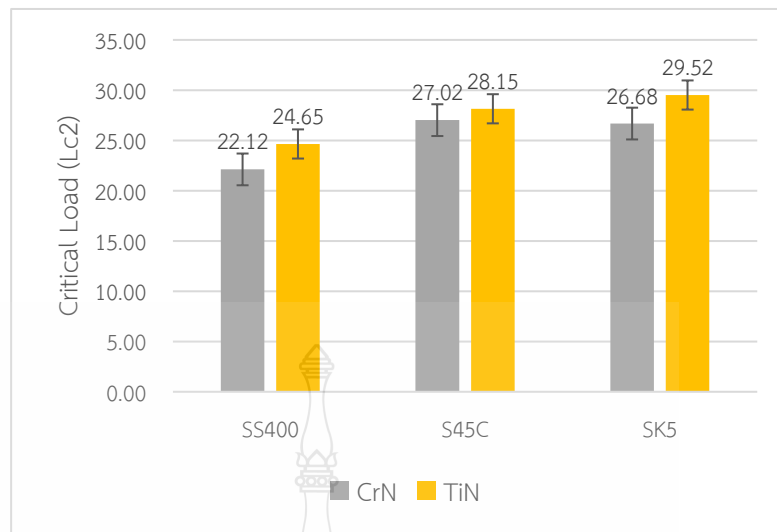
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของผิวเคลือบที่มีผลต่อค่าความแข็ง (HV) ของวัสดุ

4.2.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน

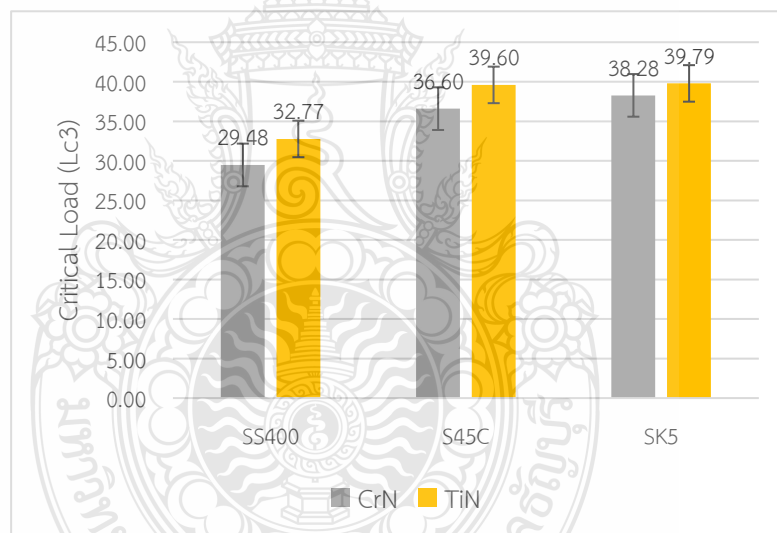
จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำวิกฤต โดยให้แรงกระทำเริ่มต้นที่ 0.5 นิวตัน เพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้ายที่ 75 นิวตัน ซึ่งวัดค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตกร้าว (Lc1) รูปที่ 4.5 ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกของผิวเคลือบ (Lc2) และรูปที่ 4.6 ค่าแรงวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบหลุดออกจากวัสดุอย่างสมบูรณ์ (Lc3) รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบ CrN และ TiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน (ทดสอบโดยบริษัท HELMUT FISCHER) ในงานวิจัยนี้พบว่าความหนาของชั้นเคลือบ TiN (1.98 – 2.09 microns) จะมีค่าน้อยกว่า CrN (3.00 - 3.21 microns) แต่พบว่า CrN มีความแข็งแรงในการยึดเกาะบนวัสดุได้น้อยกว่า จึงมีการหลุดลอกสมบูรณ์เร็วกว่า TiN ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งของ TiN มีความแข็งอยู่ในช่วง 2,622.24 – 2,665.52 HV และ CrN ความแข็งอยู่ในช่วง 1,715.85 – 1,998.04 HV



รูปที่ 4.4 Critical Loads (LC1) เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN



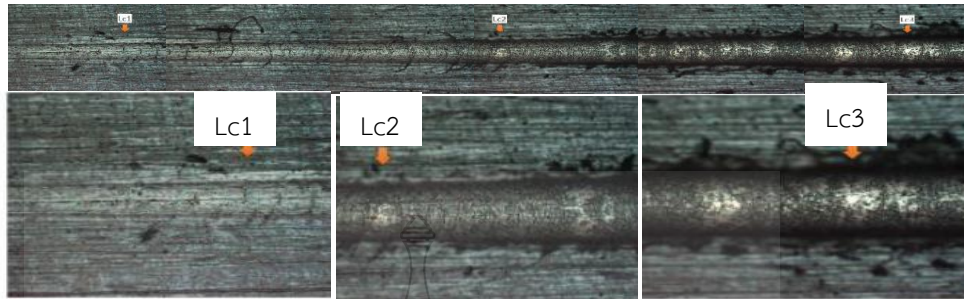
รูปที่ 4.5 Critical Loads (LC2) เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN



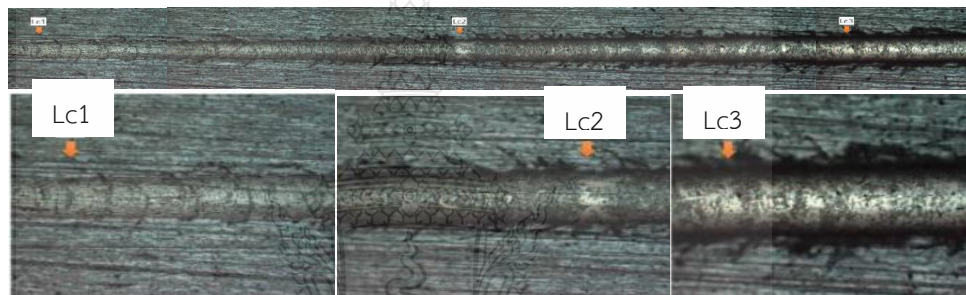
รูปที่ 4.6 Critical Loads (LC3) เมื่อทำการทดสอบ scratch test บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 พบว่าในช่วง Lc1 ชั้นเคลือบ CrN มีความสามารถในการต้านทานต่อการขีดข่วนได้ดีกว่าชั้นเคลือบ TiN เป็นผลเนื่องจากเมื่อชั้นเคลือบได้รับแรงกระทำในสิ่งแวดล้อมที่มีออกซิเจนร่วม จะเริ่มปรากฏออกไซด์ขึ้นและยังพบว่าออกไซด์ของธาตุโครเมียม (Cr) จะมีลักษณะเป็นฟิล์ม ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการกระแทกร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์

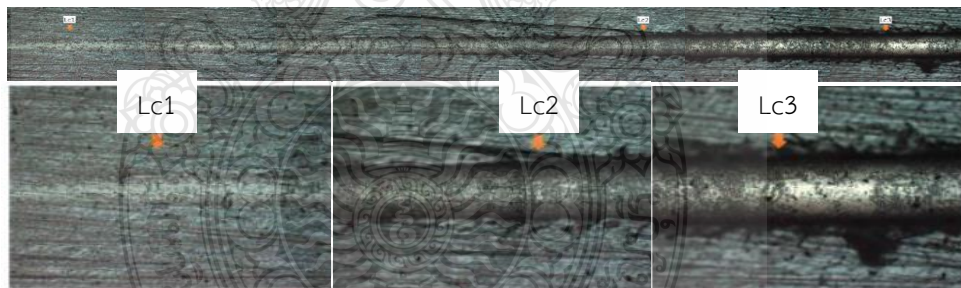
ของธาตุไทเทเนียมที่เกิดขึ้น จะมีผลในการเพิ่มการสึกหรอและความเสียหาย ทำให้แรงวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแตกมากกว่า CrN



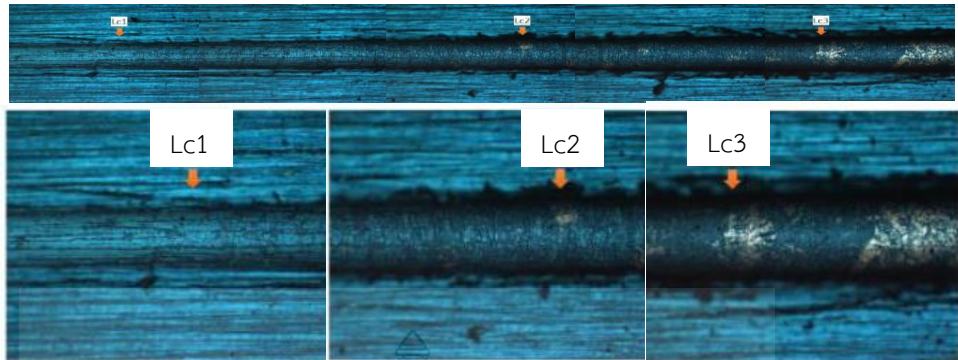
รูปที่ 4.7 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด SS400/CrN



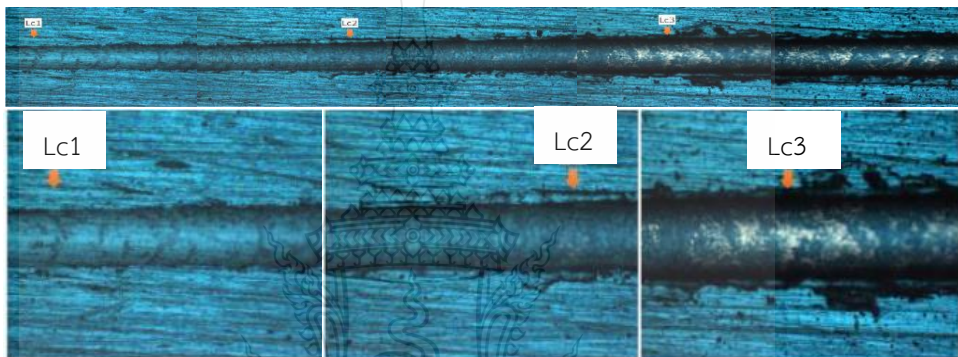
รูปที่ 4.8 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด S45C/CrN



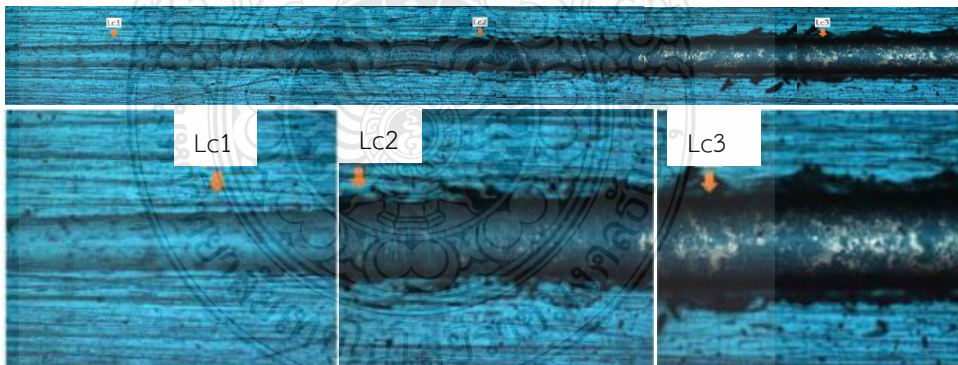
รูปที่ 4.9 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด SK5/CrN



รูปที่ 4.10 รอยกตจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด SS400/TiN



รูปที่ 4.11 รอยกตจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด S45C/TiN



รูปที่ 4.12 รอยกตจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีด SK5/TiN

4.3 การวิเคราะห์ผล

4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่า ปริมาณของธาตุคาร์บอน (C) ของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 S45C และ SK5 คือ 0.19 0.43 0.82 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในสภาวะจำหน่วยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กจะมีโครงสร้างผลึก เรียกว่าคาร์ไบด์ (Carbide) กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) แต่เมื่อนำเหล็กกล้าดังกล่าวไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้แข็งขึ้น (Hardening) โครงสร้างจะเปลี่ยนไปจากเดิม กลายเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ขนาดเล็ก เมื่อทำการอบคืนไฟ (Tempering) เพื่อทำให้เหล็กดังกล่าวมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น คือ ไม่แข็งเปราะ จะพบว่าเม็ดคาร์ไบด์จะมีความมันขึ้น ส่งผลให้เหล็กในสภาวะนี้มีค่าการทดสอบความแข็งแต่เหนียว และส่งผลให้ทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น ในท้องตลาดผู้ผลิตนิยมเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในการผลิต เนื่องจากมีราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย จากตารางที่ 4.8 เหล็กกล้าชนิด SS400 มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ 0.13% ทำให้มีสมบัติทางกลเช่น ความแข็ง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิวต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยความร้อนจึงไม่สามารถทำได้โดยตรง เหล็กกล้าชนิด S45C มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมสูง 0.37% จะมีสมบัติทางกลที่ดี ความแข็ง ความแข็งแรง และสามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีร้อยละการยืดตัวที่ปานกลางและ เหล็กกล้าชนิด SK5 มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมสูง 0.73% จะมีสมบัติทางกลที่ดี ความแข็ง ความแข็งแรง และสามารถต้านทานต่อการสึกหรอสูง แต่ขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากมีร้อยละการยืดตัวที่ต่ำ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

ชนิดเหล็กกล้า	%C	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SS400	0.13	375.96	248.28	43
S45C	0.37	1149.27	1149.05	11
SK5	0.73	1087.66	1085.34	2

4.3.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน

จากหัวข้อ 4.2 พบว่า เมื่อเคลือบวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยฟิล์มบาง CrN และ TiN ที่ความหนา 2-3 ไมโครเมตร พบว่าวัสดุ SS400 S45C และ SK5 มีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งยิ่งสูงสามารถบอกลถึงความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด พบว่าค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตกร้าว (Lc1) ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกของผิวเคลือบ (Lc2) และค่าแรงวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบหลุดออกจากวัสดุอย่างสมบูรณ์ (Lc3) สูงกว่าสารเคลือบ CrN แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ TiN มีความสามารถในการยึดเกาะที่พื้นผิวของวัสดุได้ดี ในวัสดุ S45C SK5 และ SS400 ที่เคลือบด้วย TiN พบว่ามีความต้านทานการขีดได้ดีกว่าเคลือบด้วย CrN ตามลำดับ

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบ เพราะภายในเนื้อฟิล์มบางจะมีอะตอมของธาตุไทเทเนียมอยู่ เมื่อสัมผัสกับธาตุออกซิเจนที่บรรยากาศ จะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มบางสารประกอบออกไซด์ปกคลุมผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยฟิล์มบางที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แสดงว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากงานวิจัยนี้เป็นฟิล์มบางที่เมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานแล้วแสดงสมบัติในการต้านทานการสึกหรอให้กับชิ้นงานได้ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยปรับปรุงผิววัสดุเดิมจนมีความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

นอกจากการพิจารณาชนิดของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลแล้ว ต้นทุนการผลิตก็ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญในการเลือกวัสดุและกระบวนการในการผลิตให้มีความคุ้มค่าและเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยปัจจุบันใบมีดโรตารีพรวนดินที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จะมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ใบละ 120 บาทต่อหน่วย ในงานวิจัยนี้ จึงได้จำแนกต้นทุนตามขั้นตอนการผลิต ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนค่าแรงงาน ต้นทุนค่าวัสดุดิบ และต้นทุนค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ต้นทุนค่าแรงงาน ได้แก่

- 1.ค่าแรงงานในตัดแผ่นใบมีด 350 บาท/วัน อัตราการผลิต 10 ชิ้น/ชั่วโมง คิดเป็น 4.38 บาท/หน่วย
- 2.ค่าแรงงานการขึ้นรูปใบมีด 350 บาท/วัน อัตราการผลิต 4 ชิ้น/ชั่วโมง คิดเป็น 10.93 บาท/หน่วย
- 3.ค่าแรงงานในการชุบแข็ง 59.5 บาท/หน่วย

4. ค่าแรงงานเคลือบผิว PVD 3,000 บาท/หน่วย

ต้นทุนค่าวัตถุดิบ ได้แก่

1. ค่าวัสดุ SS400 ราคา 25.47 บาท/หน่วย
2. ค่าวัสดุ S45C ราคา 20.58 บาท/หน่วย
3. ค่าวัสดุ SK5 ราคา 440 บาท/หน่วย
5. ค่าแม่พิมพ์ตัด 20,000 บาท ผลิตได้ 100,000 ชิ้น คิดเป็น 0.2 บาท/หน่วย
6. ค่าแม่พิมพ์คมตัด 25,000 บาท ผลิตได้ 100,000 ชิ้น คิดเป็น 0.25 บาท/หน่วย
7. ค่าแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูป 143,000 บาท ผลิตได้ 100,000 ชิ้น คิดเป็น 1.43 บาท/หน่วย

ต้นทุนค่าใช้จ่ายอื่นๆ ได้แก่

1. ค่าไฟฟ้า ใช้เกณฑ์ไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน ราคา 5.69 บาท/หน่วย
- ค่าไฟในการตัดและการขึ้นรูปใบมีด คิดเป็น 3 บาท/หน่วย

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน (บาท)

วัสดุ	สถานะ	ค่าวัสดุ	ค่าแรงตัด	ค่าแรงขึ้นรูป	ค่าแรงชุบแข็ง	ค่าแรงการเคลือบผิว	ค่าไฟฟ้า	ต้นทุนต่อหน่วย
SS400	ชุบแข็ง	25.47	4.38	10.93	59.5	0	3	103.28
	เคลือบ PVD	25.47	4.38	10.93	59.5	3000	3	3,103.28
S45C	ชุบแข็ง	20.58	4.38	10.93	59.5	0	3	98.39
	เคลือบ PVD	20.58	4.38	10.93	59.5	3000	3	3,098.39
SK5	ชุบแข็ง	440	4.38	10.93	59.5	0	3	517.81
	เคลือบ PVD	440	4.38	10.93	59.5	3000	3	3,517.81

จากตารางที่ 4.4 ทำให้สามารถวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของใบมีดโรตารีพรวนดินต่อ 1 หน่วยได้ และสามารถนำมาประกอบการตัดสินใจพิจารณาเลือกวัสดุและกระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสมต่อไป

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะการทดลอง

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาวัสดุ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กคาร์บอนต่ำ SS400 เหล็กคาร์บอนปานกลาง S45C และเหล็กคาร์บอนสูง SK5 ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เทคนิควิศวกรรมพื้นผิวระหว่างผิวสัมผัสโดยใช้ฟิล์มแข็งเคลือบบนวัสดุตั้งกล่าว ด้วยสารเคลือบจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ ทำให้อายุการใช้งานของใบมีดเพิ่มขึ้น ผลการทดลองมีดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ทำให้ระบบผลึกของโลหะเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพจำหน่วย SS400 มีสมบัติในการยึดตัวได้ดีแต่ความแข็งแรงต่ำ S45C มีความแข็งและแข็งแรงสูง มีความเหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และ SK5 มีความแข็งแต่เปราะจึงขึ้นรูปได้ยาก โดย S45C มีค่า Tensile strength สูงที่สุดเท่ากับ 1149.27 N/mm^2 ซึ่งสูงกว่า SS400 (375.96 N/mm^2) และ SK5 (1087.66 N/mm^2)

5.1.2 เมื่อนำวัสดุมาทำการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN พบว่าวัสดุ S45C มีความแข็งสูงสุด เมื่อเคลือบด้วย TiN เท่ากับ 2722.79 HV และ CrN เท่ากับ 1995.85 HV และผลทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุทั้ง 3 ชนิด 2 สารเคลือบ พบว่ามีลักษณะรอยขีดแบบ Conformal ซึ่งเป็นลักษณะรอยแตกจากการขีดทดสอบ

5.1.3 จากค่าผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า วัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน คือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสถานะที่มีการเคลือบผิวด้วย TiN เนื่องจากวัสดุ S45C มีความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งจะส่งผลให้ผิวเคลือบมีความแข็งแรงสูงสุดด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะการทดลอง

ในการวิจัยพบว่า วัสดุในการผลิตใบมีดโรตารีพรวนดินที่เคลือบด้วย TiN และ CrN เป็นการวิจัยต้นแบบเท่านั้น ในการนำไปใช้งานจริง ต้องมีการศึกษาเพื่อให้นำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตจริงได้ จึงมีข้อเสนอแนะการทดลองดังนี้

5.2.1 ในการวิเคราะห์ราคาดุลยภาพ (Equilibrium Price) ในการวิจัย เนื่องการเคลือบผิวส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต ทั้งทางตรงและทางอ้อม จึงต้องเปรียบเทียบผลกระทบต่อคุณภาพ

ในเรื่องของระยะทางที่ใช้พรวนดินจากการทดสอบอัตราที่สึกหรอ เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุที่ดีที่สุดกับการนำไปใช้งาน

5.2.2 จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการเคลือบชนิดอื่นที่มีความสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี จึงควรศึกษาโดยนำมาเคลือบบนวัสดุที่มีความเหมาะสม เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุในการทำใบมีด

5.2.3 ควรทดสอบวัสดุที่ทำการเคลือบผิวแข็งผลิตเป็นใบมีดพรวนดินเพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุในท้องตลาดที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวแข็ง เพื่อพยากรณ์อายุการใช้งานของใบมีด และคำนวณหาความคุ้มค่าในการใช้ฟิล์มเคลือบใบมีดเพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ

5.2.4 การเคลือบผิวด้วย TiN สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลที่ดีของใบมีดได้ แต่ควรศึกษาการพัฒนาการใบมีดพรวนดิน โดยเพิ่มชิ้นงาน insert ที่ทำการเคลือบผิวเรียบร้อยแล้วมาสวมเข้ากับบริเวณปลายคมตัดที่มีอัตราการสึกหรอสูง ทดแทนการเคลือบใบมีดทั้งใบเนื่องจากจะสามารถลดต้นทุนผลิตได้



บรรณานุกรม

- [1] ภาวะสังคมของครัวเรือนเกษตรกร. [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก <https://www.oae.go.th>. 28 กันยายน 2564.
- [2] มงคล กวางวโรภาส. 2530. เครื่องทุ่นแรงในฟาร์ม. บริษัทประชาชนจำกัด กรุงเทพมหานคร.
- [3] Kawamura, N. (1999). Tillage machine. Soil Dynamic in Tillage and Traction, pp.110. In W.Kittisamarn (eds.). MSc Thesis. An electric cultivator. Department of Agricultural Engineering. Kasetsart University, Bangkok, Thailand.
- [4] สราวุธ เหล่าพงศ์สวัสดิ์, 2521, การศึกษาเปรียบเทียบแรงที่กระทำกับไ้มัดจอบหมุน 3 ชนิด Doctoral dissertation, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ์ และกวี ศรีทองกุล, “การวิจัยและพัฒนาไ้มัดจอบหมุนสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศ ตอนที่ 1 การหาคุณลักษณะและวัดแรงต้านทานพลศาสตร์ที่กระทำกับไ้มัดจอบหมุน”.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, วันที่ 18-20 ตุลาคม 2547, จังหวัดขอนแก่น.
- [6] SS400 Mechanical Properties. [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก (<http://www.meadinfo.org>), 14 พฤษภาคม 2564.
- [7] MatWeb Material Property Data. [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก (<https://www.matweb.com>), 14 พฤษภาคม 2564.
- [8] Steel Special steel suppliers . [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก (<https://www.steelss.com>), 14 พฤษภาคม 2564.
- [9] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, นรพร กลั่นประชา และอนินท์ มีมนต์. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : เซนเกจ เลินนิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด.
- [10] Japanese Standards Association, JIS G 4051:2016 (JISF) Carbon steels for machine structural use, 2016, p.3.
- [11] Zhang, Y., Wang, Q., Ramachandran, C. S., Guo, P., & Wang, A. (2022). Microstructure And Performance of High-Velocity Oxygen-Fuel Coupled Physical Vapor Deposition (HVOF-PVD) Duplex Protective Coatings: A Review. Coatings, 12(10), 1395.
- [12] Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. Coatings, 8(11), 402.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Mansoor, N. S., Fattah-alhosseini, A., Elmkhah, H., & Shishehian, A. (2020). **Electrochemical behavior of TiN, CrN and TiN/CrN nanostructured coatings on the nickel-chromium alloy used in dental fixed prosthesis.** Journal of Asian Ceramic Societies, 8(3), 694-710.
- [14] **Tensile Test.** [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html. 28 กันยายน 2564,
- [15] Tomastik, J., & Ctvrtlik, R. (2013). **Nanoscratch test—A tool for evaluation of cohesive and adhesive properties of thin films and coatings.** In EPJ web of conferences (Vol. 48, p. 00027). EDP Sciences.
- [16] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). **Materials science and engineering: an introduction** (Vol. 7, pp. 665-715). New York: John wiley & sons.
- [17] อธิพิล เตี้ยวณิชย์. **การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก.** สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] Tomastik, J., & Ctvrtlik, R. (2013). **Nanoscratch test—A tool for evaluation of cohesive and adhesive properties of thin films and coatings.** EPJ web of conferences (Vol. 48, p. 00027). EDP Sciences.
- [19] Rath, T. (2018). **Influence of reactive gas flow ratio during sputter deposition of Mo-ON thin films on their structure and properties** (Doctoral dissertation, University of Leoben). p.15.
- [20] Mo, J. L., & Zhu, M. H. (2009). **Tribological oxidation behaviour of PVD hard coatings.** Tribology International, 42(11-12), 1758-1764.
- [21] ปกรณ์ ชุมรัมย์, วารุณี เปรมานนท์, & คมกริช ละวรรณวงษ์. (2016). **การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด (Application of surface modification for Extension tool life in blanking process).** The Journal of Industrial Technology, 12(1), 13-27.
- [22] วรพจน์ อ้นกระทอง. **การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท,** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Sulaiman, M. H., Sheng, A. O. C., Farahana, R. N., & Bienk, K. (2019, November). **Corrosion resistance of PVD hard coatings for tribological engineering applications**. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 670, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.
- [24] Adesina, A. Y., Gasem, Z. M., & Mohammed, A. S. (2019). **Comparative investigation and characterization of the scratch and wear resistance behavior of TiN, CrN, AlTiN and AlCrN cathodic arc PVD coatings**. Arabian Journal for Science and Engineering, 44, 10355-10371.
- [25] Guan, C., Fu, J., Cui, Z., Wang, S., Gao, Q., & Yang, Y. (2021). **Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades**. Soil and Tillage Research, 209, 104933.
- [26] เฉลิม ชุนเอียด, ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ. (2021). **สมบัติทางไทรบอโลยีของเครื่องมือตัดและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตัดดิน**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 6(1), 1-11.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง



ก.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอน

ตารางที่ ก.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SS400

รายการ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	เฉลี่ย
พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	73.66	73.00	71.71	72.79
Max. Load (kN)	27.30	27.37	27.42	27.36
Tensile strength (N/mm ²)	370.62	374.90	382.37	375.96
Yield point (kN)	16.88	19.07	18.25	18.07
Yield strength (N/mm ²)	229.14	261.24	254.45	248.28
Elongation (%)	42	46	42	43

ตารางที่ ก.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ S45C

รายการ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	เฉลี่ย
พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	74.40	74.40	74.40	74.40
Max. Load (kN)	81.80	86.43	88.29	85.51
Tensile strength (N/mm ²)	1099.42	1161.69	1186.71	1149.27
Yield point (kN)	81.77	86.42	88.28	85.49
Yield strength (N/mm ²)	1099.09	1161.51	1186.54	1149.05
Elongation (%)	11	10	12	11

ตารางที่ ก.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SK5

รายการ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	เฉลี่ย
พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	53.28	59.00	55.46	55.91
Max. Load (kN)	65.78	54.39	61.36	60.51
Tensile strength (N/mm ²)	1234.62	921.94	1106.43	1087.66
Yield point (kN)	65.65	54.26	61.24	60.38
Yield strength (N/mm ²)	1232.13	919.71	1104.19	1085.34
Elongation (%)	2	2	2	2



ก.2 ผลการทดสอบการวัดความหนาของผิวเคลือบ

ตารางที่ ก.2.1 ผลการทดสอบการวัดความหนาของผิวเคลือบ (ไมโครเมตร)

รายการ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
SS400/CrN	3.00	2.95	3.06	3.00
S45C/CrN	3.22	3.22	3.20	3.21
SK5/CrN	3.13	3.11	3.02	3.09
SS400/TiN	2.01	2.15	2.11	2.09
S45C/TiN	1.85	1.84	2.16	2.02
SK5/TiN	2.20	2.08	1.98	2.02



ก.3 ผลการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ (HV)

ตารางที่ ก.3.1 ผลการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ (HV)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
SS400/CrN	1,876.86	1,587.75	2,529.52	1,998.04
S45C/CrN	1,819.74	1,595.75	1,732.06	1,715.85
SK5/CrN	1,445.29	2,024.97	2,324.02	1,931.43
SS400/TiN	2,953.95	2,738.34	2,174.42	2,622.24
S45C/TiN	2,747.53	2,686.79	2,734.06	2,722.79
SK5/TiN	2,810.80	2,600.42	2,585.34	2,665.52

ตารางที่ ก.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแกนกลางของวัสดุที่ผ่านการกระบวนการเคลือบ PVD (HV)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
SS400/CrN	440.4	485.5	483	469.63
S45C/CrN	498.5	589.9	553.2	547.20
SK5/CrN	569.1	559.5	580.6	569.73
SS400/TiN	564.2	635.2	632.2	610.53
S45C/TiN	699.9	779	751.2	743.37
SK5/TiN	833.6	781.6	739	784.73

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





Proceedings

Conference 2023

24 - 26 พฤษภาคม 2566

ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซนอร์ส พัทยา
จังหวัดชลบุรี

The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023



การประชุมวิชาการราชมณฑลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

MTC 2023



“ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG

เพื่อตอกย้ำเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs”

Conference Topics

- Production and Operations Management
- Manufacturing Engineering
- Material Science and Application
- Supply Chain and Logistics
- Industrial Education
- Technology and Innovation

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2023 ประจำเครือข่าย

รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์	มีมนต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย	ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ก้าวหน้า	จงวัฒนารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์	วรรณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิธิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์	เถื่อนแก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน	ตุ้ยแพร่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นทีชัย	ผัสดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิรวัดน์	ณ พัทลุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ว่าที่ร้อยเอก ศุภภัทร	ศิลาออย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุติ	หอมรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ดร.ประจักษ์	จิตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัชนะ	กาญจนกาญจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์	วัชรศรีสาเรง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ สัญญา	คำจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์	มุแกม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์	พรพฒศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณน	สุจาวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เนรัญชลา	กำไลทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์	ระวีวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮดี	สนิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพร	ใจดำรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ	ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์	แจ่มกมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์	ชวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.กชกร	วิรัชกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.อิทธิพล	เนคมานุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สุทธิพงษ์	จำรูญรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



ช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.กรุงเทพ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2023 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณะกรรมการอำนวยการ มีหน้าที่กำหนดนโยบาย แนะนำ ให้คำปรึกษาและติดตามการดำเนินงานของคณะกรรมการให้สำเร็จด้วยความเรียบร้อยและบรรลุวัตถุประสงค์ในด้านต่างๆ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย	จันทร์มณี	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพรัตน์	ภักย์วิมุตติ	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลธรรม	เอฬกานนท์	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูริวัตร	คัมภีร์ภาพพัฒน	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล	ชุดเจือจิ้น	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยศักดิ์	คล้ายแดง	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาล	สุขมัน	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช	แสงสีดา	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา	ศรีสัตยกุล	กรรมการ
อาจารย์ วรพันธ์	แก้วพิทยาภรณ์	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงาน มีหน้าที่กำหนดแผนงาน กำกับดูแล สนับสนุนการดำเนินงานในโครงการ รวมทั้งการประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์	ชูวารี	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ	ช่วยพันธ์	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา	ศรีสัตยกุล	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม	ศิวาวุธ	รองประธานกรรมการ
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	กรรมการและเลขานุการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์	แจ่มกมล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช	แสงสีดา	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย	เภาเนียม	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์	เสาร์แดน	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ	กาญจนแสงทอง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ	เยี่ยมชัยภูมิ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์	หาญมนต์	กรรมการ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลธรรม	เอฬกานนท์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส	มณีสาย	กรรมการ
อาจารย์ ดร.สมชาย	วนไทยสงค์	กรรมการ
อาจารย์ เอกชัย	รอดพิสา	กรรมการ
นายฤกษ์ณะ	อ่วมนุสนธิ์	กรรมการ
นายพินิจ	บุญหล้า	กรรมการ
นายวงศธร	วงศ์อินทร์	กรรมการ
นางสาวทิพวดี	สันติวีระพันธ์	กรรมการ
นางสาวสุภัตรา	ชาวเหนือ	กรรมการ

คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์ มีหน้าที่จัดทำสูจิบัตร แผ่นพับ โปสเตอร์ ประชาสัมพันธ์และเผยแพร่ข่าว ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ประกาศในสื่อสิ่งพิมพ์และทางเว็บไซต์

อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	ประธานกรรมการ
อาจารย์ สุรเทพ	แป้นเกิด	กรรมการ
นางสาวศุภมาศ	ลิ้มภัย	กรรมการ
นางสาวรัตนา	โก้วฒนชัย	กรรมการ
นางสาวฐิติรัตน์	แสงบุญเกิด	กรรมการ
นายทรงพล	จิตตโกศล	กรรมการ
นายวงศธร	วงศ์อินทร์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายสารสนเทศและโสตทัศนูปกรณ์ มีหน้าที่อำนวยความสะดวกด้านการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ โสตทัศนูปกรณ์ เครื่องเสียง ให้กับวิทยากรและผู้เข้าร่วมประชุม บันทึกภาพนิ่งและวีดิทัศน์กิจกรรม ในการประชุมวิชาการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชุติภยัษฐิ์	กมลขันธิธร	ประธานกรรมการ
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	รองประธานกรรมการ
นายอรุณพล	เอกสกุล	กรรมการ
นายมนตรี	ชินการชวย	กรรมการ
นายฤกษ์ดานนท์	แก้วภูล	กรรมการ
อาจารย์ สุรเทพ	แป้นเกิด	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการฝ่ายการเงิน มีหน้าที่จัดเก็บค่าลงทะเบียน ดูแลการเบิกจ่ายและการชำระบัญชีให้เป็นไปตามระเบียบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลธรรม	เอฬกานนท์	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช	แสงสีด้า	รองประธานกรรมการ
อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์	ชวารี	กรรมการ
นายธนันต์	คำหล้า	กรรมการ
นางสาวอูมา	แสงจันทร์	กรรมการ
นางสาวสิริพร	มิ่งงามทรัพย์	กรรมการ
นางสมบุญ	เกิดสมบัติ	กรรมการ
นางนาฎนภา	จระเข้	กรรมการ
นางสาวธัญญ์นรี	อุเทน	กรรมการ
นางแววดาว	พรหมมา	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายจัดซื้อจัดจ้าง มีหน้าที่จัดซื้อวัสดุและจัดจ้าง สำหรับใช้ในการดำเนินงานโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม	ศิวาวุธ	ประธานกรรมการ
อาจารย์ ดร.สมชาย	วนไทยสงค์	กรรมการ
อาจารย์ เอกชัย	รอดพิสา	กรรมการ
นายธนันต์	คำหล้า	กรรมการ
นายวงศธร	วงศ์อินทร์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายประเมินผล มีหน้าที่จัดทำแบบประเมินผล เก็บรวบรวมข้อมูลและจัดทำรายงานการดำเนินโครงการ

อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์	ชวารี	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์	แจ่มกมล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์	เสาร์แดน	กรรมการ
อาจารย์ ดร.สมชาย	วนไทยสงค์	กรรมการ
อาจารย์ เอกชัย	รอดพิสา	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	กรรมการและเลขานุการ
นายฤกษ์ณะ	อ่วมนุสนธิ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการประสานงานบทความงานประชุมวิชาการ RMTC 2023

- | | |
|------------------------------------|---------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย | จันทร์มณี |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ | ช่วยพันธ์ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา | ศรีสัตยกุล |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม | ศิวารุช |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์ | แจ่มกมล |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช | แสงสีดา |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย | ภาเนียม |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์ | เสาร์แดน |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ | กาญจนแสงทอง |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ | เยี่ยมชัยภูมิ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ | หาญมนต์ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลธรรม | เอฬกานนท์ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส | มณีสาย |
| 14. อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ | ชูวารี |
| 15. อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์ | คำคุณ |
| 16. อาจารย์ ดร.สมชาย | วนไทยสงค์ |
| 17. อาจารย์ เอกชัย | รอดพิสา |

สาขาในการประชุม RMTC 2023

- Production and Operations Management (POM)
- Manufacturing Engineering (MFE)
- Material Science and Application (MSA)
- Supply Chain and Logistics (SCL)
- Industrial Education (IED)
- Technology and Innovation (TIN)



ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewer)

รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์	ระวิงวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ	ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์	สุวรรณรังสี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์	เหล่านากาศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย	ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.คมกริช	ละวรรณวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร์	เชาวนทปัญญา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี	หอมเขียว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ วรพงศ์	บุญช่วยแทน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ เดช	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์	แก้วพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฐิติ	หมอรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	จันทร์มนีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์	พรเพ็ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์	มุแกม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์	แจ่มกมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพร	ใจดำรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไยดี	สนิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เนรัญชลา	กำไลทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อภิโชติธนกฤต	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณน	สุจารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ	กาญจนแสงทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นทีชัย	ผัสดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (เชียงใหม่)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชนะชัย	จุมผา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิกิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์	ยอดเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเวช	เชื้อวงษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิงกล	ศรีธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พชร	ชาตะวิถิ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์	วิชาผา	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรา	สมัตถภาพงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อันเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิวัฒน์	บุญมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน	ตั๋ยแพร่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (เชียงใหม่)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาโนช	ริทินโย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรณ	เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์	เมืองน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรวัดน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พงศกร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชรพล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิติวัฒน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพดล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรินทร์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพงศ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยงยุทธ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุไรวรรณ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสาน
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรจิตร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองเพียร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ
 อาจารย์ ดร.สมชาย
 อาจารย์ ดร.ฉัตรพล
 อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์
 อาจารย์ ดร.ชัยณรงค์
 อาจารย์ ดร.วิเรชา
 อาจารย์ ดร.ศักดิ์ดา
 อาจารย์ ดร.ปริญญา
 อาจารย์ ดร.สุริยพงศ์
 อาจารย์ ดร.ภาสุรีย์
 อาจารย์ ดร.นุชนาฏ
 อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์
 อาจารย์ ดร.ประจักษ์
 อาจารย์ ดร.ณราตี
 อาจารย์ ดร.พ.ท.พิสิฐ

อิทธิพลิน
 เองฉ้วน
 ณ พิทลุง
 เสาร์แดน
 หลีตระกูล
 ศรีสัตยกุล
 แสงสีดา
 คล้ายนิล
 ภูเก้าล้วน
 ตัมพวิรุฬห์
 กาญจนะ
 วัชรศรีสำเริง
 จุลเกษมศักดิ์
 จิระนันตสิน
 ศรีพุทธา
 กลั่นเงิน
 เหลาหา
 เกิดลาภ
 ดุลยกุล
 พงสา
 แสงเขียว
 ฤทธิดา
 หมัดสีะ
 แจ่มแสง
 พรหมบุตร
 เภาเนียม
 ทองขาว
 วุฒิสงค์
 พิมพ์า
 ชูวารี
 ศรีระบุตร
 คำจันทร์
 คำจันทร์
 กวีกิจบัณฑิต
 นิลสังข์
 ล้ำสกุล
 ใจดำรงค์
 เกื้อนแก้วสิงห์
 จิตกุล
 สิทธิเดชธำรง
 เจือไทย

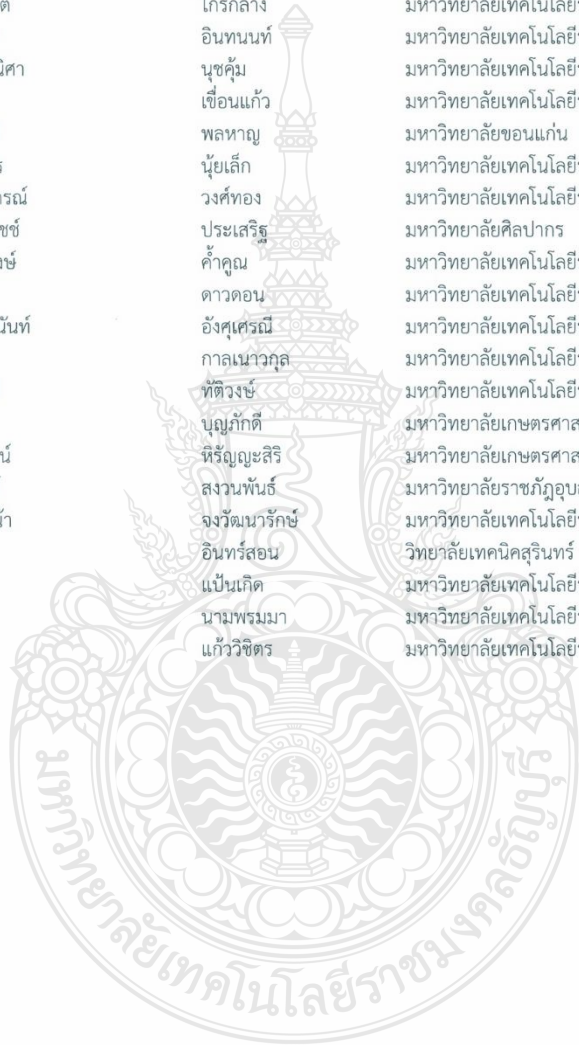
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ศรีราชา)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เฉลิมพระเกียรติสกลนคร)
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เฉลิมพระเกียรติสกลนคร)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 มหาวิทยาลัยทักษิณ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า



อาจารย์ ดร.วาสนา
อาจารย์ ดร.เอกชัย
อาจารย์ ดร.ปรเมศวร์
อาจารย์ ดร.คมกริช
อาจารย์ ดร.วีระพล
อาจารย์ ดร.ภูริพัส
อาจารย์ ดร.รุ่งสันต์
อาจารย์ ดร.ณภัทร
อาจารย์ ดร.วรรณนิศา
อาจารย์ ดร.ธีระวุฒิ
อาจารย์ ดร.โกวิทย์
อาจารย์ ดร.กนกอร
อาจารย์ ดร.รัตนภรณ์
อาจารย์ ดร.ธรรมวิชัย
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์
อาจารย์ ดร.วิทยา
อาจารย์ ดร.ณัฐชานันท์
อาจารย์ ดร.ภูริ
อาจารย์ ดร.กวีวีร์
อาจารย์ ดร.วรุฒม์
อาจารย์ ดร.ดวงรัตน์
อาจารย์ ดร.วรวิทย์
อาจารย์ ดร.ก้าวหน้า
อาจารย์ ดร.วิทยา
อาจารย์ สุรเทพ
อาจารย์ สุรัชัย
อาจารย์ เกษญา

พวงพรพิทักษ์
คุปตวาทีน
เป้าวรรณ
จันทร์เสนา
ทับทิมดี
แสนพงษ์
ไกรกลาง
อินทนนท์
นุชคุ้ม
เชือนแก้ว
พลหาญ
นุ้ยเล็ก
วงศ์ทอง
ประเสริฐ
คำคุณ
ดาวดอน
อังศุธรณี
กาลเนาวกุล
ทัดวงษ์
บุญภักดี
ธีรญูเกียรติ
สงวนพันธ์
จงวัฒน์รักษ์
อินทร์สอน
แป้นเกิด
นามพรมมา
แก้ววิชิตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี)
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจุลราชธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (ขอนแก่น)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



สารบัญ

เรื่อง		หน้า
MFE-212	กระบวนการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วโดยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงมิติ	130
MFE-214	การออกแบบและพัฒนาใบมีดโรตารีพรวนดินโดยการวิเคราะห์การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	132
MFE-215	การศึกษาผลกระทบของสารเคลือบ AlCrSiTiN , TiAlSiN ที่มีผลต่อการกลึงจานดิสเบรก	133
MFE-216	การพัฒนาเครื่องกวนหมอนหยาแบบควบคุมอุณหภูมิแก๊สอินทรีย์สำหรับผู้ประกอบการรายย่อย เพื่อยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน	135
MFE-217	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งหมอนด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	137
MFE-218	การปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อลดต้นทุนในสายการผลิตชิ้นส่วนแผ่นยึดโครงตัวถังรถกระบะ	138
MFE-219	อิทธิพลของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน	140
MFE-222	อิทธิพลของการอบอ่อนต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ PLA จากการพิมพ์สามมิติด้วยระบบการฉีดเส้นวัสดุ	141
MFE-223	การออกแบบและสร้างเครื่องกรอวนตาเตกึ่งอัตโนมัติ	142
MFE-224	การออกแบบและสร้างเครื่องกรอเส้นใยอวนระบบอัตโนมัติ	144
MFE-225	การออกแบบและพัฒนาเครื่องไสช่วงยาวไปเป็นเครื่องกัดช่วงยาว	146
MFE-226	วิธีการดำเนินงานวิจัยสร้างเครื่องวัดความกว้างความเอียงและระยะทางของรางรถไฟ	148
MFE-227	การศึกษาความหนาผิวที่มีผลต่อสมบัติทางไตรโบโลยีของโพลีออกซิเมทิลีนที่ผ่านกระบวนการกลึง	150
MFE-229	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการฉีดพลาสติกฉีดกดทับ PA66 โดยเทคนิคทากูชิ	152
MFE-230	การจำลองรัศมีของดรอว์บีตที่มีผลต่อการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมแบบไม่สมมาตร	154
MFE-232	การวิเคราะห์ความสามารถด้านการขึ้นรูปของพลาสติกไนลอนเกรด PA6 ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	155
MFE-233	อิทธิพลของปัจจัยสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA5083 กับ AA6061 โดยมีวัสดุเสริมแรงในแนวเชื่อม	156

อิทธิพลของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน Influence of Coating on Mechanical Property of Rotary Tiller Blades

ทิวาวรรณ เปลี่ยนกลิ่น¹ อโนทัย ผลสุวรรณ² และศิริชัย ต่อสกุล^{3*}

^{1,3*} สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: sirichai.to@en.rmutt.ac.th*

Thiawan Plienklin¹ Anothai Pholsuwan² and Sirichai Torsakul^{3*}

^{1,3*} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

² Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thunyaburi

E-mail: sirichai.to@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของเหล็กกล้าและชนิดของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของคมตัดของใบมีดโรตารีพรวนดิน โดยศึกษาเหล็กเครื่องมือทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ SS400, S45C และ SK5 โดยนำชิ้นงานมาเคลือบผิวด้วยวิธีไอกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) ด้วยสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ความหนาของสารเคลือบประมาณ 3 ไมโครเมตร จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile Strength) ทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ ทดสอบการยึดเกาะของสารเคลือบ ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า S45C มีค่า Tensile Strength สูงสุด เท่ากับ 1149.27 N/mm² และเมื่อนำมาเคลือบผิวด้วย TiN มีความแข็งสูงกว่า CrN ร้อยละ 36.2 ดังนั้นวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน คือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสภาวะที่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ คำหลัก ใบมีดโรตารี เคลือบผิวด้วยวิธีไอกายภาพ โครเมียมไนไตรด์ ไทเทเนียมไนไตรด์

Abstract

The objective of this research was to study steel types and types of coatings affecting the wear behavior of cutting edge of rotary tiller blades. Three types of steels; SS400, S45C and SK5 were studied by physical vapor deposition (PVD) on the specimens with two types of coatings, titanium nitride (TiN) and chromium nitride (CrN), the thickness of the coating is about 3 micrometers. The mechanical properties of the workpiece were obtained by tensile strength testing, hardness of the coating and adhesion of the coating. In conclusion, results found that S45C had the highest tensile strength 1149.27 N/mm². Then coated with TiN, the hardness was higher than CrN around 36.2%. The suitable material for rotary tiller blades is S45C carbon steel with TiN coated.

Keywords: Rotary Tiller Blades, Physical Vapour Deposition, Chromium nitride, Titanium nitride

1. บทนำ

สินค้าเกษตรเป็นสินค้าที่มีความสำคัญในการหล่อเลี้ยงชีวิตให้กับคนไทยมาอย่างยาวนาน ทั้งด้านการบริโภคภายในประเทศ การส่งออก และยังเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสินค้าเพื่ออุปโภคบริโภค รวมถึงอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆอีกด้วย แต่เกษตรกรเป็นอาชีพที่มีความยากลำบาก ทำให้จำนวนเกษตรกรมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในปีการเพาะปลูก 2561/2565 อายุเฉลี่ยของเกษตรกรไทยเท่ากับ 58.09 ปี [1] เมื่อแรงงานภาคเกษตรของไทยมีอายุมากขึ้น เกิดปัญหาประสิทธิผลการผลิตในอนาคตลดลง รถแทรกเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่เกษตรกรนิยมใช้เพื่อเป็นเครื่องทุ่นแรง ในปัจจุบันมีการใช้งานรถแทรกเตอร์การเกษตรเพื่อปรับพื้นผิวดิน รถแทรกเตอร์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญและมีส่วนช่วยในการเป็นเครื่องจักรต้นกำลังในการทำการเกษตร นอกจากนี้แนวคิดในการพัฒนาระบบควบคุมใบมีดให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ต่างๆแล้ว ยังต้องพัฒนาใบมีดให้มีความคม ความแข็งแรงและความเหนียว จึงสามารถใช้ในการเกษตรได้ดี [2] ใบมีดพรุนดินเป็นวัสดุที่ใช้ขุดและพรุนดินโดยตรง เมื่อใบมีดเคลื่อนไปในดินจะทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction) ทำให้ใบมีดเกิดความสึกหรอหรือหัก เกิดความเสียหาย เนื่องจากกระแทกกับวัตถุที่มีความแข็งสูง ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนใบมีด

ในการเลือกวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้คำนึงถึงส่วนผสมทางเคมีที่มีธาตุผสมด้านทานการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย เนื่องจากการใช้งาน ต้องมีการสัมผัสกับความชื้นภายในดิน วัสดุทั้ง 3 ชนิดได้แก่ SS400 S45C และ SK5 มีธาตุผสมคือนิกเกิลและแมงกานีส ปริมาณใกล้เคียงกัน ปรับปรุงสมบัติด้วยการเคลือบผิว เพื่อให้ผิวของชิ้นงานมีความแข็งแรงทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น ในสภาพจำหน่ายของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ไม่ได้ระบุความสามารถในการเคลือบผิวด้วยวิธี PVD ผู้วิจัยจึงเลือกวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ในการวิจัย ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของใบมีดด้วยการเคลือบผิว ซึ่งสามารถทำได้จากกระบวนการทางเคมีและวิธีไอกายภาพ แต่การเคลือบผิวด้วยกระบวนการทางเคมีมักจะมีสารเคมีจำนวนมาก จึงทำให้เกิดปัญหามลพิษ สำหรับ

การเคลือบด้วยวิธีไอกายภาพ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สามารถควบคุมความหนาและองค์ประกอบทางเคมีได้อย่างเที่ยงตรง [3] ทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพสูงกว่าอีกด้วย ฟิล์มแข็งที่นิยมใช้ได้แก่โลหะกลุ่ม ทรานซิชันไนไตรด์ (transition metal nitrides) เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่โดดเด่น เช่น มีความแข็งสูงมีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนจุดหลอมเหลวสูง [4 - 6] ได้แก่ TiN และ CrN เป็นต้น หรือการเปรียบเทียบคุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ stainless steel เกรด 304 ที่ใช้สารเคลือบผิว TiN CrN AlTiN และ AlCrN [7] พบว่า สารเคลือบสามส่วนผสมสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 900 องศาเซลเซียส แต่สารเคลือบสองส่วนผสมจะมีความสามารถในการยึดเกาะชิ้นงานได้ดีกว่า หากเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มแข็ง TiN และ CrN พบว่า TiN ได้รับความนิยมนสูงกว่าเนื่องจาก มีความแข็งสูงประมาณ 20 GPa [8] สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงเกิน 500 องศาเซลเซียสได้ ส่วน CrN มีความแข็งสูง ทนการเสียดสี การกัดกร่อน ทนอุณหภูมิสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ มีการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของสารเคลือบผิวบนใบมีดชนิด Q235 พบว่า ใบมีดที่เคลือบด้วย TiAlN และ CrN สามารถเพิ่มความแข็งให้กับใบมีดได้ และสามารถลดการสึกหรอได้ [9]

จากสมบัติดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์ม และศึกษาถึงชนิดของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรุนดิน โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ เพื่อเพิ่มสมบัติทางความแข็งของเหล็กกล้าซึ่งหาได้ง่ายและราคาถูก อย่างไรก็ตาม การเคลือบผิวด้วยวิธีไอกายภาพมีผลกระทบในด้านต้นทุนการผลิต จึงต้องพิจารณาการเลือกใช้วัสดุและชนิดของสารเคลือบอย่างรอบคอบ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตใบมีดพรุนดินต่อไป

2. การเคลือบผิวด้วยไอกายภาพวิธีสปัตเตอริง (PVD - Sputtering)

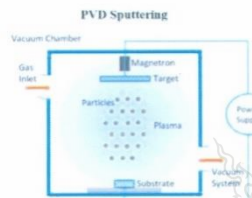
เคลือบผิวด้วยวิธีไอกายภาพนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูงคือวิธีสปัตเตอริง จากรูปที่ 1

เป้า (Target) คือวัสดุที่นำมาเป็นผิวเคลือบ จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟให้เป็นขั้วแคโทด และชิ้นงานจะวางอยู่บนฐานที่เป็นแอโนด โดยวางหันหน้าเข้าหากัน ก๊าซที่ใช้ในการสเปดเตอร์ เช่น ก๊าซเฉื่อยจะถูกป้อนเข้ามาในเตาสัญญากาศ โดยให้ความดันไม่เกิน 100 mtorr ปล่องกระแสไฟฟ้า 2-3 กิโลวัตต์ไปยังขั้วแคโทด เมื่ออะตอมของก๊าซเฉื่อยเริ่มแตกตัวเป็นไอออน (+) และอิเล็กตรอน (-) ไอออนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจนวิ่งไปชนเป้า และกระแทกเอาอะตอมของวัสดุเคลือบให้หลุดออกมาได้ อะตอมที่ถูกกระแทกออกมาจะได้รับพลังงานมาด้วยจึงวิ่งในทิศที่ออกมาจากเป้า บางส่วนที่จะวิ่งไปเกาะที่ผิวชิ้นงานจนกลายเป็นผิวเคลือบ

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

วัสดุในการทดลองประกอบด้วย SS400 S45C และ SK5 มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (%wt)

ธาตุ	SS400	S45C	SK5
Fe	สมดุล	สมดุล	สมดุล
C	0.13	0.37	0.73
Mn	0.43	0.62	0.38
P	0.02	0.02	0.02
Al	0.05	0.01	0.02
Ni	0.03	0.06	0.02
S	0.01	0.02	0.01
Si	0.01	0.23	0.18
Cr	0.01	0.12	0.15
W	0.03	0.03	0.03



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการ PVD แบบสเปดเตอร์ [10]

ฟิล์มบาง TiN และ CrN ในงานทดลองนี้ เตรียมด้วยวิธี Arc and Sputter จากเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ SULZER META-PLAS IONON รุ่น MZR 303 ดังรูปที่ 3 มีเป้าสารเคลือบ Ti (99.99%) และ Cr (99.99%) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.3 เซนติเมตร ใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสเปดเตอร์ และแก๊สไนโตรเจน (99.999%) เป็นแก๊สไวต่อปฏิกิริยา



รูปที่ 3 เครื่องเคลือบผิว

3. วิธีการวิจัย

การศึกษาวิธีการดำเนินงานเริ่มต้นจากขั้นตอนการเลือกวัสดุตัวอย่างที่ใช้เป็นโม่โรตารีพรุนดินโดยวัสดุตัวอย่าง ประกอบด้วย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S45C และเหล็กกล้าคาร์บอนสูงเกรด SK5 จากนั้นตัดชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มิลลิเมตร หน้า 7 มิลลิเมตร เพื่อทำการชุบแข็งและอบคืนไฟ ซึ่งเป็นสภาพจริงโม่โรตารีพรุนดินที่มีขายในท้องตลาด มีกรอบการวิจัยดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบการวิจัย

ขั้นตอนการเคลือบเริ่มจากนำชิ้นงานทดสอบมาขัดเปิดผิวหน้าด้วยเครื่องขัดผิวแบบล้อผ้า หลังจากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิก ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องล้างทำความสะอาด

นำชิ้นงานเข้าห้องเคลือบ รูปที่ 5 ลดความดันของห้องเคลือบ ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 500 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อวินาที และอาร์กอน 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เวลาที่ใช้ประมาณ 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ 400-450 องศาเซลเซียส นำเข้าสู่กระบวนการทดสอบต่างๆ เพื่อเก็บข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงรายละเอียดในส่วนของผลการวิจัยต่อไป



รูปที่ 5 ห้องเคลือบ

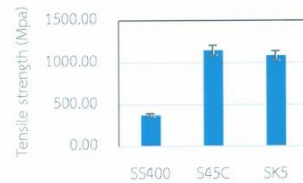
4. อภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน

เหล็กกล้าชนิด SS400 มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ 0.13% ทำให้มีสมบัติทางกลเช่น ความแข็ง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิวต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยความร้อนจึงไม่สามารถทำได้โดยตรง จากรูปที่ 6 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ พบว่า เหล็กกล้าชนิด S45C มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมปานกลาง 0.37% จะมีสมบัติทางกลที่ดี ความแข็ง ความแข็งแรง และสามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีร้อยละการยืดตัวที่ปานกลางและเหล็กกล้าชนิด SK5 มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมสูง 0.73% จะมีสมบัติทางกลที่ดี ความแข็ง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อการสึกหรอสูง แต่ขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากมีอัตราการยืดตัวที่ต่ำ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

ชนิดเหล็กกล้า	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SS400	375.96	248.28	43
S45C	1149.27	1149.05	11
SK5	1087.66	1085.34	2



รูปที่ 6 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

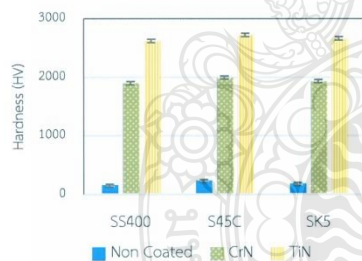
4.2 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบ

จากการวัดความหนาของผิวเคลือบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) พบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มเคลือบอยู่ระหว่าง 2-3 ไมครอน โดยชิ้นงานที่เคลือบ CrN มีความหนาเฉลี่ย 3 ไมครอน และชิ้นงานที่เคลือบ TiN มีความหนาเฉลี่ย 2 ไมครอน ดังตารางที่ 3 เนื่องจากสปีตเตอร์ยิลด์ (Sputter Yield) ของ Cr และ Ti มีค่าต่างกัน โดยสปีตเตอร์ยิลด์ของ Cr และ Ti มีเท่ากับ 1.3 และ 0.6 ตามลำดับ[11] ดังนั้น อะตอมของ Cr ที่ถูกสปีตเตอร์ออกมาจะมีค่าสูง ทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงมากกว่า Ti จึงส่งผลต่อความหนาของฟิล์ม ดังตารางที่ 3 แสดงผลการวัดความหนาของผิวเคลือบ

ตัวอย่าง	ความหนาของผิวเคลือบ (µm)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
SS400/CrN	3.00	2.95	3.06	3.00
S45C/CrN	3.22	3.22	3.20	3.21
SK5/CrN	3.13	3.11	3.02	3.09
SS400/TiN	2.01	2.15	2.11	2.09
S45C/TiN	1.85	1.84	2.16	2.02
SK5/TiN	2.20	2.08	1.98	2.02

4.3 ผลการทดสอบความแข็งจุลภาค (Microhardness tester)

ในการดำเนินการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบทำการทดสอบใช้แรงกดที่ผิวของสารเคลือบ 20 ไมโครนิวตันเป็นเวลา 15 วินาที จำนวน 3 ครั้งต่อตัวอย่าง (ทดสอบโดยบริษัท HELMUT FISCHER) เมื่อพิจารณาอิทธิพลค่าความแข็งของผิวเคลือบ จะพบว่า วัสดุที่เคลือบด้วย TIN และ CrN มีความแข็งเท่ากับ 2,722.79 และ 1995.85 HV ตามลำดับ เมื่อความแข็งของผิวเคลือบมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งสูง จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าวัสดุที่อ่อนกว่า [12] เมื่อความแข็งที่มีค่ามาก ทำให้มีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนรูปถาวรมีค่ามากขึ้น ขนาดของพื้นที่สัมผัสเมื่อวัสดุเปลี่ยนรูปจึงมีค่าน้อย แรงเสียดทานจึงน้อยลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงนั่นเอง เมื่อพิจารณาจากฟิล์มแข็งที่เคลือบบนวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S45C และ SK5 จะพบว่า TIN มีความแข็งสูงกว่า CrN จึงทำให้เกิดการสึกหรอน้อยส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือเพิ่มขึ้น แสดงค่าความแข็งในรูปแบบที่ 7

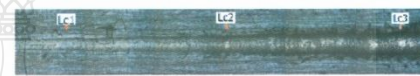


รูปที่ 7 อิทธิพลของผิวเคลือบที่มีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุ

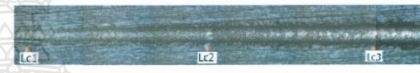
4.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขีด

เมื่อเคลือบวัสดุด้วยฟิล์มบาง CrN และ TIN ที่ความหนา 2-3 ไมโครเมตร พบว่าวัสดุ SS400 S45C และ SK5 มีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งที่สูงสามารถบอกลถึงความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีเยี่ยม จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด จะพบรอยกดบริเวณชั้นเคลือบดังรูปที่

8 ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตกร้าว (Lc1) ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดล่อนของผิวเคลือบ (Lc2) สูงกว่าสารเคลือบ CrN ดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ TIN มีความสามารถในการยึดเกาะที่พื้นผิวของวัสดุได้ดี ในวัสดุ S45C SK5 และ SS400 ที่เคลือบด้วย TIN พบว่ามีความต้านทานการขีดได้ดีกว่าเคลือบด้วย CrN ตามลำดับ



รูปที่ 8 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ SS400 ที่เคลือบผิวด้วย CrN



รูปที่ 9 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ S45C ที่เคลือบผิวด้วย CrN



รูปที่ 10 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ SK5 ที่เคลือบผิวด้วย CrN



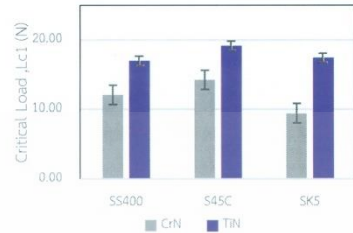
รูปที่ 11 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ SS400 ที่เคลือบผิวด้วย TIN



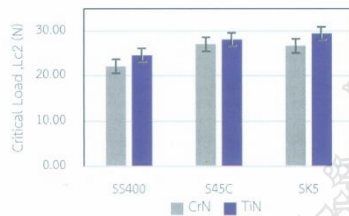
รูปที่ 12 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ S45C ที่เคลือบผิวด้วย TIN



รูปที่ 13 รอยกดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดของวัสดุ SK5 ที่เคลือบผิวด้วย TIN



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 แรงกระทำวิกฤต (Critical load) เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน บนวัสดุ SS400 S45C และ SK5 ที่เคลือบด้วย CrN และ TiN
ก) ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (Lc1)
ข) ค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดร่อนสมบูรณ์ (Lc2)

5. สรุป

5.1 เหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของใบมีดโรตารีพรวนดินเนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ทำให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะจำหน่าย [13] SS400 มีความสามารถในการยึดตัวได้ดีแต่ความแข็งแรงต่ำ S45C มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง มีความเหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และ SK5 มีความแข็งแรงแต่เปราะจึงขึ้นรูปได้ยาก

5.2 การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ ทำให้ความแข็งที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น โดยสารเคลือบ TiN จะมีความแข็งแรงสูงกว่า CrN บนวัสดุชนิดเดียวกัน ส่งผลให้ TiN มีความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นเคลือบสูงกว่า CrN

5.3 จากค่าผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า วัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตใบมีดโรตารีพรวนดิน คือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสภาวะที่มีการเคลือบผิวด้วย TiN

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองกษาปณ์ ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษารวมทั้งวัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนภายใต้ทุนสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภายใต้กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, "ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร" สืบค้นเมื่อวันที่ 28 กันยายน 2564
- [2] M.J. Campbell, New Technology and Rural Development-The Social Impact, The Association of Development Research and Training Institutions of Asia and the Pacific, Routledge London and New York, 1990.
- [3] Musil, J., Baroch, P., Vlcek, J., Nam, K.H. and Han, J.G. (2005). Reactive Magnetron Sputtering of Thin Films: Present Status and Trends. Thin Solid Film. Vol. 475, pp. 208-218
- [4] Gong C., Zhang J., Yan C., Cheng X., Zhang J., Yu L., Jin Z. and Zhang Z. (2012). Synthesis and microwave properties of nanosized titanium nitride. Journal of Materials Chemistry. 22(8), 3370-3376.
- [5] Popovic, M., Novakovic, M. and Bibic, N. (2015). Annealing effects on the properties of TiN

- thinfilms. Processing and Application of Ceramics, 9, 67-71.
- [6] Polcar, T., Martinez, R., Vitu, T., Kopeck , L., Rodriguez, R. and Cavaleiro, A. (2009). High Temperature Tribology of CrN and Multilayered Cr/CrN Coatings. Surface and Coatings Technology. Vol. 203. pp. 3254-3259
- [7] Adesina, A. Y., Gasem, Z. M., & Mohammed, A. S. (2019) Comparative investigation and characterization of the scratch and wear resistance behavior of TiN, CrN, AlTiN and AlCrN cathodic arc PVD coatings. Arabian Journal for Science and Engineering, 44, 10355-10371.
- [8] McIntyre, D., Greene, J. E., Håkansson, G., Sundgren, J. E., & Münz, W. D. (1990). Oxidation of metastable single - phase polycrystalline Ti0.5Al0.5N films: Kinetics and mechanisms. Journal of Applied Physics, 67(3), 1542-1553.
- [9] Guan, C., Fu, J., Cui, Z., Wang, S., Gao, Q., & Yang, Y. (2021). Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades. Soil and Tillage Research, 209, 104933.
- [10] Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. Coatings, 8(11), 402.
- [11] พัชรารรณ วรณทวี. (2561). โครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีแอคทีฟดีซีสเป็คเตอรียงจากเป้าสารเคลือบแบบโมเสก. วารสารบัณฑิตศึกษา มจร. บ้านสมเด็จเจ้าพระยา 4 (2)กรกฎาคม-ธันวาคม 2562
- [12] คมกริช ละววรรณวงษ์. (2009). การศึกษานิตของฟิล์มเคลือบแข็งและความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอโดยการทำงานด้วยวิธี Ball-on-disk. Engineering Journal of Research and Development, 20(4), 84-91.
- [13] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนันท์ มีมนต์ และนพพร กลั่นประชา, วัสดุวิศวกรรม.กรุงเทพมหานคร : เซนเกจเลิร์นนิ่ง,2550.



การประชุมวิชาการระดับภาคเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า
ที่วาระ ณ เปลี่ยนกลิ่น, อโชนทัย ผลสุพรรณ, ศิริชัย ตอลสกุล

ได้เข้านำเสนอบทความเรื่อง

อิทธิพลของสารเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของใบมีดโรตารีพรวนดิน

การประชุมวิชาการระดับภาคเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พญา จังหวัดชลบุรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ มีมนต์)
นายกสมาคมเครือข่ายรายวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ



การประชุมวิชาการงานศึกษาด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
RMITC 2023 **ครั้งที่ 8**
 The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณเพื่อรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง : อิทธิพลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของไบโอดีโรทาร์ฟรวานดิน

โดย

ทิวารรณ เป็ลียนกลิน, อโณทัย ผลสุวรรณ, ศิริชัย ต้อสกุล

ได้รับรางวัล The Best Paper Award รองอันดับที่ 2 กลุ่มสาขาาน Manufacturing Engineering (MFE)

การประชุมวิชาการงานศึกษาด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
 ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี


 (รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์)

นายกสมาคมเครือข่ายรายชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นามสกุล	นางสาวทิวาวรรณ เปลียนกลิ่น
วันเดือนปีเกิด	27 มกราคม 2536
ที่อยู่	18/4 หมู่ 1 ตำบลบางแม่นาง อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี 11110
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	นักวิชาการกษาปณ์ปฏิบัติการ กองกษาปณ์ กรมธนารักษ์ พ.ศ. 2562 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	084 - 636 - 9535
อีเมลล์	thiwawan_p@mail.rmutt.ac.th

