

การเพิ่มอายุวงจรเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 10 บาท ด้วยสารเคลือบผิว
AlCrN และ TiN ในเหล็กกล้าเครื่องมือ

IMPROVEMENT OF A 10-BAHT CIRCULATION COIN'S DIE-SERVICE LIFE
USING ALCRN AND TIN COATINGS ON TOOL STEEL

ศุภกร แสงแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มอายุวงจรหาเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 10 บาท ด้วยสารเคลือบผิว
AlCrN และ TiN ในเหล็กกล้าเครื่องมือ

ศุภกร แสงแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มอายุวงจรหล่อรีดเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 10 บาท ด้วยสารเคลือบผิว AlCrN และ TiN ในเหล็กกล้าเครื่องมือ
	Improvement of a 10-Baht Circulation Coin's Die-Service Life Using AlCrN and TiN Coatings on Tool Steel
ชื่อ - นามสกุล	นายศุภกร แสงแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2568

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


 ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ณัฐา คุปต์ขันธ์, Ph.D.)


 กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, ปร.ด.)


 กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)


 กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
 (รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)
 วันที่ 19 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2568

Thesis Title Improvement of a 10-Baht Circulation Coin's Die-Service Life
Using AlCrN and TiN Coatings on Tool Steel

Name – Surname Mr.Suppakorn Saengkaew

Program Industrial and Manufacturing Engineering

Thesis Advisor Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.

Academic Year 2025

ABSTRACT

This research aims to investigate the effect of various surface coatings on the wear of dies used to mint the obverse of 10-Baht circulation coins, with the objective of extending their service life. The primary issue limiting the end of a die's service life is the flaking of its PVD coating, which typically occurs after an average of 250,000 coins have been minted.

In this experiment, three types of cold-work tool steel: X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrWV6-3-3 were used as die materials. These materials were coated using a Physical Vapor Deposition (PVD) process with three different coating materials: chromium nitride (CrN), titanium nitride (TiN), and aluminum chromium nitride (AlCrN). The coatings were evaluated based on residual stress, adhesion, surface roughness, scratch resistance, and hardness. The final performance was assessed through coining trials, and all results were confirmed by statistical analysis.

The results indicated that the X110CrMoV8-2-1 die coated with aluminum chromium nitride (AlCrN) demonstrated the best performance. Its mechanical properties, including adhesion, hardness, and scratch resistance, were superior to those of the TiN and CrN coatings. Consequently, these properties led to the longest service life in the coining trials, reaching 450,000 coins, which is 1.8 times longer than the original service life of 250,000 coins. Moreover, the AlCrN-coated die exhibited the least amount of wear.

Keywords: aluminum chromium nitride, coin die, thin-film coating

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์ขันธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง และรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ที่ให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางการ จัดทำงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขจุดบกพร่อง เพื่อให้เล่มงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ มากที่สุด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านผู้อำนวยการกองกษาปณ์ และนายธีระยุทธ วงศ์สมานมณี ผู้อำนวยการ ส่วนดวงตราในขณะนั้น และเจ้าหน้าที่ส่วนดวงตราทุกท่าน เจ้าหน้าที่ตราเหรียญ เจ้าหน้าที่ตรวจวัด คุณภาพ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมและให้ความร่วมมือในการดำเนินการ ทดลองและเก็บผลทดสอบของงานวิจัย จนได้ผลลัพธ์สำเร็จลุล่วงด้วยความราบรื่นเป็นอย่างดี

สิ่งที่สำคัญอีกหนึ่งสิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และพี่น้องกองกษาปณ์ ที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้คำปรึกษาต่างๆ จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ สำเร็จลุล่วงเกี่ยวกับการศึกษาทดลองงานเคลือบผิว PVD จึงขอมอบงานวิจัยนี้แก่กองกษาปณ์ เพื่อเป็น ประโยชน์ทางราชการและประเทศชาติ

ศุภกร แสงแก้ว

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	15
1.3 สมมติฐานงานวิจัย	15
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	15
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	16
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	16
1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย	17
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ (Definition of Terms)	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.1 เหรียญ 10 บาท.....	18
2.2 โลหะทองแดง	18
2.3 อะลูมิเนียม [12]	19
2.4 นิกเกิล (Nickel) [12].....	20
2.5 โลหะผสมทองแดงนิกเกิล (Cupronickel) [12]	20
2.6 บรอนซ์อะลูมิเนียม (Aluminium bronze)	21
2.7 การอบชุบทางความร้อน [12]	22
2.8 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ (Physical vapor deposition : PVD) [14]	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 ขั้นตอนการผลิตดวงตราและตีตราเหรียญกษาปณ์	25
2.10 การสึกหรอแบบยึดเหนี่ยว (Adhesion Wear).....	27
2.11 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear) [16]	28
2.12 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของสารที่ใช้เคลือบผิว Scratch test [17].....	29
2.13 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress).....	31
2.14 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE).....	33
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	38
3.1 ดำเนินการเลือกใช้วัสดุดวงตราเหรียญ 10 บาท.....	38
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองชิ้นงาน.....	39
3.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE).....	44
3.4 การทดสอบดวงตรา	46
3.5 การควบคุมคุณภาพ	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	50
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะ	50
4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE).....	54
4.3 ผลการทดสอบดวงตรา.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ.....	91
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	96
ประวัติผู้เขียน	107

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 10 บาท.....	18
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเหล็กทำดวงตราเหรียญ 10 บาท.....	39
ตารางที่ 3.2	แสดงขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนในแต่ละเกรดเหล็ก	42
ตารางที่ 3.3	แสดงคุณสมบัติของเหรียญตัวเปล่าโลหะสองสี ชนิดราคา 10 บาท	49
ตารางที่ 4.1	ผลการวัดความเค้นตกค้าง (Residual Stress).....	53
ตารางที่ 4.2	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา.....	57
ตารางที่ 4.3	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัย Coat และ Steel มีผลต่อความหยาบผิว (Roughness)...	58
ตารางที่ 4.4	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความหยาบผิวมีผลต่ออายุการใช้งานดวงตรา	59
ตารางที่ 4.5	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่อความสามารถในการเกาะยึด ของผิวเคลือบ (Scratch Test).....	60
ตารางที่ 4.6	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) ต่ออายุการใช้งาน	61
ตารางที่ 4.7	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัย Coat และ Steel ต่อความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) .	62
ตารางที่ 4.8	การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) ต่ออายุการใช้งาน ..	63
ตารางที่ 4.9	ค่าความหยาบก่อนตีตราและหลังตีตรา	66
ตารางที่ 4.10	ค่าความหยาบพื้นผิว Sa และ Ssk ระหว่าง K340 ด้วยสารเคลือบ AlCrN และ K490 ด้วยสารเคลือบ CrN (หน่วยไมโครเมตร)	69
ตารางที่ 4.11	แสดงอายุการใช้งานเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	79

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงจำนวนสาเหตุการหมดอายุการใช้งานดวงตราเหรียญ 10 บาท ด้านหน้า.....	13
รูปที่ 1.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) สาเหตุการหมดอายุของดวงตรา ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561- 2566	14
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุของโลหะผสมทองแดงนิกเกิล[12]	21
รูปที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอัตราส่วนทองแดงผสมอะลูมิเนียม	22
รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตดวงตรา.....	25
รูปที่ 2.4 แม่ย่อยลายหรือดวงตราต้นแบบ.....	25
รูปที่ 2.5 เครื่องจักร CNC Engraving Machine	26
รูปที่ 2.6 การถอน.....	26
รูปที่ 2.7 เครื่องถอนดวงตราเหรียญษาปณ์หมุนเวียน	27
รูปที่ 2.8 แสดงเสียดสีระหว่างกันกับเนื้อวัสดุ [15].....	28
รูปที่ 2.9 แสดงการสึกหรอจากการขัดถู [15]	29
รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทั่วไปของ Scratch Tester.....	30
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จาก Sensor ในเครื่อง Scratch Test.....	30
รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของรอยขีดจากเครื่อง Scratch Test	31
รูปที่ 2.13 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ที่ได้จากการขีดในแบบต่างๆ [18]	31
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานหุ่นเหล็ก.....	39
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดดวงตรา	40
รูปที่ 3.3 เครื่องกดไฮดรอลิก.....	40
รูปที่ 3.4 ดวงตราษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท.....	41
รูปที่ 3.5 เครื่องอบชุบด้วยความร้อน Heat Treatment	41
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความแข็ง	42
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนล้างทำความสะอาดดวงตรา	43
รูปที่ 3.8 เครื่องชุบเคลือบผิว PVD.....	43
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหยาบผิว.....	46
รูปที่ 3.10 เหรียญษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท.....	47
รูปที่ 3.11 เหรียญตัวเปล่าถูกยกขอบเหรียญขึ้น (Coin Rimming)	48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.12	เครื่องตีตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน	48
รูปที่ 4.1	ภาพขยายผิวชิ้นงานแต่ละชนิดเกรดเหล็กด้วยกำลังขยาย 2,300 เท่า	52
รูปที่ 4.2	ค่าความแข็งหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟ	52
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ก่อนชุบแข็ง ชุบแข็งไม่อบคืนไฟ และ ชุบแข็งอบคืนไฟ แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3	53
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความเค้นตกค้าง (Residual Stress) แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (X) ก่อนชุบแข็ง (Y) ชุบแข็งไม่อบคืนไฟ และ (Z) ชุบแข็งอบคืนไฟ	54
รูปที่ 4.5	กราฟการทดสอบการแตกแบบปกติ	55
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการประกอบกับอายุการใช้งาน	56
รูปที่ 4.7	ค่าคงเหลือของอายุการใช้งานเครื่องมือเทียบกับลำดับการสังเกต	56
รูปที่ 4.8	กราฟ Interaction Effect Plot ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา	57
รูปที่ 4.9	กราฟ Interaction Effect Plot ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา	58
รูปที่ 4.10	กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว	59
รูปที่ 4.11	กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว แยกตามชนิด สารเคลือบ	61
รูปที่ 4.12	กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว แยกตามชนิดเหล็ก	62
รูปที่ 4.13	แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า	64
รูปที่ 4.14	แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3	64
รูปที่ 4.15	แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) บนวัสดุ เหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 ด้วยกำลัง ขยาย 50 เท่า	65
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความหยาบผิวก่อนตีตราและหลังตีตรา แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3	67
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความหยาบผิวก่อนตีตราและหลังตีตรา แบ่งตามชนิดโลหะ	68

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18	แสดง Material ratio curve ของชนิดเหล็ก X110CrMoV8-2-1 บนสารเคลือบ AlCrN...	70
รูปที่ 4.19	แสดง Material ratio curve ของชนิดเหล็ก X140CrVW6-3-3 บนสารเคลือบ CrN.....	70
รูปที่ 4.20	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1	72
รูปที่ 4.21	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X90CrMoV7-2.....	72
รูปที่ 4.22	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3	72
รูปที่ 4.23	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1.....	73
รูปที่ 4.24	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X90CrMoV7-2	73
รูปที่ 4.25	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3.....	73
รูปที่ 4.26	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1	74
รูปที่ 4.27	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X90CrMoV7-2	74
รูปที่ 4.28	การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3.....	74
รูปที่ 4.29	กราฟแสดงผลการทดสอบ Scratch Test แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3	75
รูปที่ 4.30	กราฟแสดงผลการทดสอบ Scratch Test แบ่งตามชนิดโลหะ	75
รูปที่ 4.31	กราฟแสดงค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3.....	77
รูปที่ 4.32	กราฟแสดงค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) แบ่งตามชนิดโลหะ	78
รูปที่ 4.33	กราฟแสดงอายุการใช้งานเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3.....	79
รูปที่ 4.34	พื้นผิวของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1	80
รูปที่ 4.35	พื้นผิวของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 หลังใช้งาน (กำลังขยาย 40 เท่า)	80
รูปที่ 4.36	พื้นผิวของสารเคลือบอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 หลังใช้งาน (กำลังขยาย 40 เท่า)	81

บทที่ 1

บทนำ

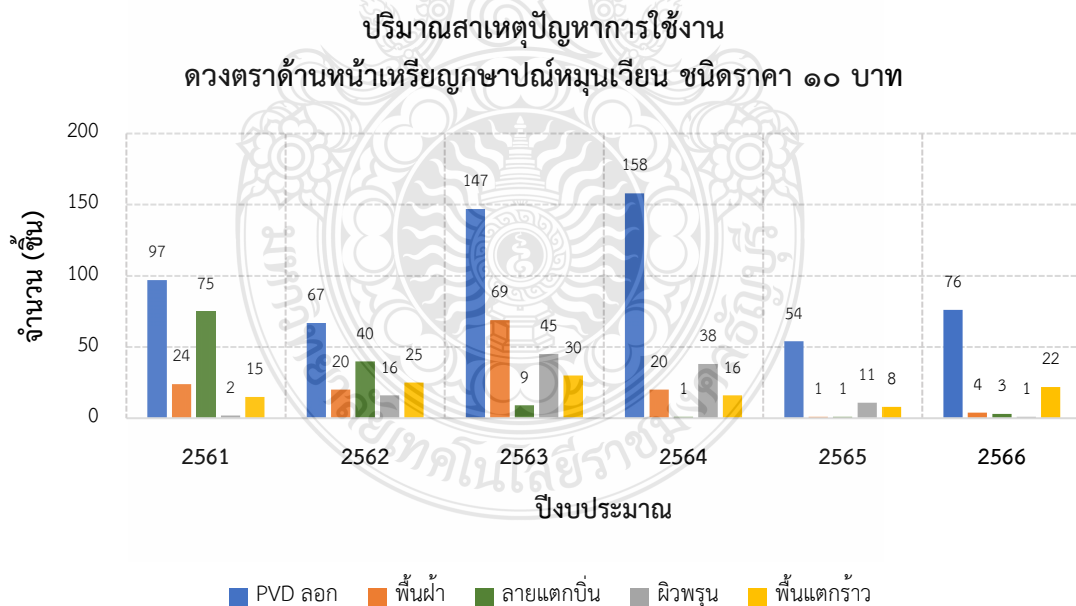
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียน (Circulation Coins) มีการดำเนินการวางแผนการผลิตและควบคุมการแลกจ่ายให้กับประชาชน ภาครัฐ และเอกชนต่างๆ ซึ่งมีกองกษาปณ์ทำพันธกิจหลักเกี่ยวกับการผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนให้เพียงพอต่อความต้องการในระบบเศรษฐกิจของประเทศ และกองกษาปณ์ได้กำหนดนโยบายในการพัฒนาองค์กรอย่างต่อเนื่อง ควบคุมระบบภายใต้มาตรฐานสากล ISO 9001:2015 [1] ที่ต้องควบคุมคุณภาพทั้งน้ำหนักและขนาดที่เหมาะสมให้สามารถใช้งานได้และมีการป้องกันการปลอมแปลงเหรียญปลอม โดยใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยเครื่องจักรที่มีความละเอียดสูงและเทคโนโลยีที่ทันสมัย รวมถึงอัตราส่วนผสมของเนื้อวัสดุโลหะเหรียญเฉพาะตัว ปัจจุบันเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ประกอบด้วยชนิดราคา 10 บาท 5 บาท 2 บาท 1 บาท 50 สตางค์ 25 สตางค์ รวมทั้งหมด 6 ชนิดราคา [2]

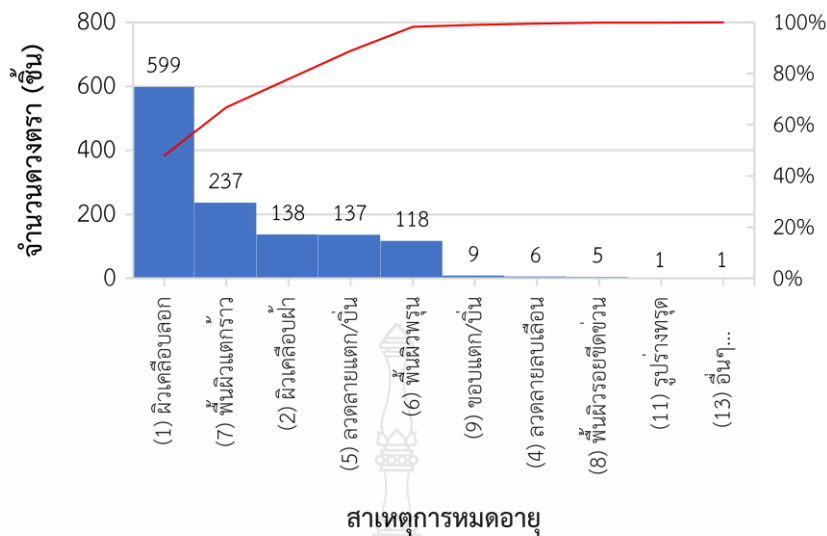
การผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนเป็นการขึ้นรูปลวดลายบนเหรียญในดวงตราแบบปิด (Closed forming) ทำให้การไหลของเนื้อวัสดุของเหรียญถูกจำกัดและไหลไปตามลวดลายของดวงตรา โดยดวงตราใช้วัสดุเหล็กประเภทเหล็กงานเย็น (Cold tool steel) การขึ้นรูปเหรียญจัดอยู่ในการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกระดับจุลภาค (Micro-forming) [3-5] และการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดแรงกดในการสร้างเหรียญที่ต้องการ [6] สามารถปรับปรุงด้วยการเคลือบผิว PVD ซึ่งสารเคลือบสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราปั๊มขึ้นรูปเหรียญได้ [7, 8] โดยเฉพาะสารอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ที่มีผลการทดสอบที่เหนือกว่า [9, 10] การวิเคราะห์ของดวงตราเหรียญที่เสียหายอีกทั้งนวัตกรรมเครื่องจักรและเครื่องมือได้รับการพัฒนาขึ้น และจะได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจทั้งในด้านจำนวนที่มากขึ้นและคุณภาพของเหรียญกษาปณ์

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียน รัชกาลที่ 10 ด้วยรูปแบบใหม่ มีด้านหน้าเป็นภาพพระบรมฉายาลักษณ์ พระบาทสมเด็จพระวชิรเกล้าเจ้าอยู่หัว ส่วนด้านหลังเป็น อักษรพระปรมาภิไธย วปร ภายใต้พระมหากษัตริย์มงกุฎ เริ่มแลกจ่ายในระบบเศรษฐกิจ เมื่อ 6 เมษายน พ.ศ. 2561 กองกษาปณ์ได้เก็บข้อมูลการตีตราตั้งแต่ปีงบประมาณปี เมษายน 2561 - 2566 พบว่าอายุการใช้งานชนิดราคาเหรียญ 10 บาท มีอายุการใช้งานเฉลี่ยด้านหน้าประมาณ 250,000 เหรียญ ซึ่งน้อยที่สุดในกลุ่มเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน จึงมีความสนใจและได้ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการผลิตดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท จากรายงานสรุปสาเหตุปัญหาพบการชำรุดปรากฏให้เห็นในลักษณะหลุดลอกของสารเคลือบผิวโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เป็นสาเหตุหลักอันดับ 1 ตั้งแต่ปี พ.ศ.2561-2566

ดังรูปที่ 1.1 และ 1.2 ซึ่งปัจจุบันในการเคลือบผิว PVD ได้เลือกใช้สารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เนื่องด้วยผลการทดลอง ดวงตรา ชนิดราคา 10 บาท ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งเคลือบครั้งแรก เมื่อดวงตราเหรียญรูปแบบรัชกาลที่ 9 แต่ผลปรากฏว่าเมื่อตีตราเหรียญแล้วทำให้สารเคลือบกันหมองบนผิวเหรียญติดแน่นกับดวงตราเกิดเป็นตำหนิไม่สามารถยอมรับได้ อีกทั้งการศึกษาของวรพจน์ที่มีผลทดลองจากการวิจัยในดวงตรา ชนิดราคา 2 บาท รูปแบบรัชกาลที่ 9 พบว่าสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีอายุการใช้งานมากกว่าสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ในวัสดุ W360 มากกว่า 600,000 เหรียญ[11] แต่ด้วยปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงด้านลวดลายทั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นรัชสมัยรัชกาลที่ 10 จึงได้มีแนวความคิดหาสารเคลือบชนิดอื่นรวมถึงวัตถุดิบเหล็กกล้าเครื่องมือที่สามารถต้านทานสึกหรอได้มากขึ้นและมีความเหมาะสมกับการตีเหรียญษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท โดยไม่ส่งผลกระทบต่อลวดลายเหรียญและแรงที่ใช้ตีตราเหรียญชนิดนี้ รวมถึงการจัดซื้อเหล็กที่ต้องปฏิบัติตามระเบียบราชการให้ถูกต้องตามขั้นตอนปฏิบัติ ดังนั้นทำให้มีข้อจำกัดในการเลือกใช้เกรดเหล็ก จึงต้องเลือกใช้วัตถุดิบเหล็กที่มีใช้ในการผลิตดวงตราในปัจจุบัน ซึ่งเหล็กที่สามารถนำมาทดลองได้คือ X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 เท่านั้น และไม่สามารถนำเหล็กเกรด W360 มาใช้ได้เนื่องจากเมื่อได้รับแรงกดที่สูง ขนาดของรูปทรงดวงตราจะมีอัตราการขยายตัวมากกว่าเหล็กทั้ง 3 เกรด



รูปที่ 1.1 แสดงจำนวนสาเหตุการหมดอายุการใช้งานดวงตราเหรียญ 10 บาท ด้านหน้า



รูปที่ 1.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) สาเหตุการหมดอายุของดวงตรา ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561-2566

ด้วยปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ศึกษาปัญหาจากงานวิจัยต่างๆ และวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของสารเคลือบ PVD บนดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท และหาสารเคลือบที่เหมาะสมดวงตราให้มีอายุการใช้งานที่มากกว่าเดิม ด้วยงานวิจัยที่ได้ศึกษาทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้สารเคลือบอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) เนื่องจากมีผลลัพธ์ที่ดีจากงานวิจัยต่างๆ และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่มีวัสดุสารเคลือบ (Target) ที่มีใช้งานกองกษาปณ์ในปัจจุบันแต่ไม่เคยนำมาเคลือบเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท หลังจากนั้นดำเนินการทดลองเคลือบผิวและทดลองใช้งาน โดยจะเคลือบแต่ละสารเคลือบ PVD ลงบนโลหะเหล็กทั้ง 3 ชนิดเกรดเหล็ก คือ X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 แล้วทำการทดสอบพื้นผิวเคลือบด้วยวิธี Adhesion Test วัดความหยาบผิว และวัดค่าความหนาของสารเคลือบผิวก่อนและหลังใช้งานตีตราเหรียญ ทดสอบพื้นผิวเคลือบด้วยวิธี Scratch Test และทดลองปั๊มขึ้นรูปเหรียญจริงเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานในแต่ละสารเคลือบของวัสดุทั้ง 3 ชนิด โดยผลที่ได้มานำมาปรับใช้กับการกระบวนการผลิตจริง เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานดวงตราเหรียญหมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท โดยข้อมูลจากผลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปยืนยันผลทางสถิติ

ผลจากการทดสอบหลายตัวแปรเป็นข้อมูลในการต่อยอดงานวิจัยไปสู่การทดลองการตีตราเหรียญหมุนเวียนชนิดอื่นๆ หรืองานตีตราประเภทเหรียญชนิดอื่นๆ เช่น เหรียญทองคำ เหรียญเงิน หรือเหรียญคิวโปรนิคเกิล ซึ่งใช้เหรียญตัวเปล่าเป็นโลหะชนิดอื่นๆ ที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ เป็นผลประโยชน์ต่อหน่วยงานราชการในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดสารเคลือบผิวที่มีผลต่อการสึกหรอของดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท

1.2.2 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท ให้ได้มากขึ้นกว่าเดิม

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำให้อายุการใช้งานของดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท ได้มากขึ้นกว่าเดิม

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 เลือกใช้วัตถุดิบเพื่อทดลอง 3 ชนิด

1.4.1.1 เหล็กกล้า เกรด X110CrMoV8-2-1 จำนวน 10 ชิ้น

1.4.1.2 เหล็กกล้า เกรด X90CrMoV7-2 จำนวน 10 ชิ้น

1.4.1.3 เหล็กกล้า เกรด X140CrVW6-3-3 จำนวน 10 ชิ้น

1.4.2 ใช้ดวงตราด้านหน้าชนิดราคา 10 บาท โดยชุบเคลือบผิว PVD ด้วยสารเคลือบ 3 ชนิด และควบคุมความหนาสารเคลือบในช่วง 2-3 ไมโครเมตร

1.4.2.1 อลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN)

1.4.2.2 โครเมียมไนไตรด์ (CrN)

1.4.2.3 ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)

1.4.3 การอบชุบเหล็กทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยเตาควบคุมสภาวะสุญญากาศ

1.4.3.1 เหล็กกล้า เกรด X110CrMoV8-2-1 ชุบแข็งที่อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂) แรงดันที่ 5 บาร์ จากนั้นอบคืนไฟที่ 570 °C จำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.

1.4.3.2 เหล็กกล้า เกรด X90CrMoV7-2 ชุบแข็งที่อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,050 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂) แรงดันที่ 5 บาร์ จากนั้นอบคืนไฟที่ 530 °C จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.

1.4.3.3 เหล็กกล้า เกรด X140CrWV6-3-3 ชุบแข็งที่อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂) แรงดันที่ 5 บาร์ จากนั้นอบคืนไฟที่ 550 °C จำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.

1.4.4 ใช้เหรียญตัวเปล่าเพื่อตีตราเหรียญในกระบวนการผลิตปัจจุบัน เป็นเหรียญประกอบติดกันแบบ Pre-fitted โดยมีวงนอกเป็นคิวโปรนิคเกิล (Cu75Ni25) และวงในเป็นอลูมิเนียมบรอนซ์ (Cu92Ni2Al6)

1.4.5 ทดสอบพื้นผิวเคลือบด้วยวิธี Adhesion Test เพื่อทดสอบการยึดเกาะของสารเคลือบ

1.4.6 วัดความหยาบผิวในบริเวณพื้นราบในลวดลาย เพื่อวิเคราะห์ความหยาบผิวก่อน และหลังใช้งานตีตราเหรียญ

1.4.7 ทดสอบพื้นผิวเคลือบด้วยวิธี Scratch test เพื่อศึกษาการต้านทานต่อการสึกหรอของสารเคลือบ

1.4.8 เครื่องตีตราเหรียญ ยี่ห้อ GRABENER ตีตราด้วยความเร็ว 700-750 เหรียญต่อนาที ควบคุมแรงในการตีตราที่ 80 ตัน ลงบนเหรียญตัวเปล่าทั้งด้านหน้าและด้านหลังภายในครั้งเดียว

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1.5.1 ศึกษาข้อมูลด้านการผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท

1.5.2 เตรียมเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

1.5.3 ดำเนินการทดลองดวงตรา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนตีตราขึ้นรูป

1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.5.6 เผยแพร่งานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.6.1 อายุการใช้งานดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท มากขึ้นกว่าปัจจุบัน

1.6.2 เป็นแนวทางและเพิ่มทางเลือกสารเคลือบผิวชนิดใหม่ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงการเพิ่มอายุการใช้งานดวงตรา

1.6.3 สามารถนำผลการทดลองไปต่อยอดในการทำวิจัยในอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางด้านการเคลือบผิว PVD

1.6.4 เพิ่มตัวเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตดวงตราในงานประเภทอื่นๆ ที่มีลักษณะการผลิตและลวดลายที่คล้ายคลึงกัน

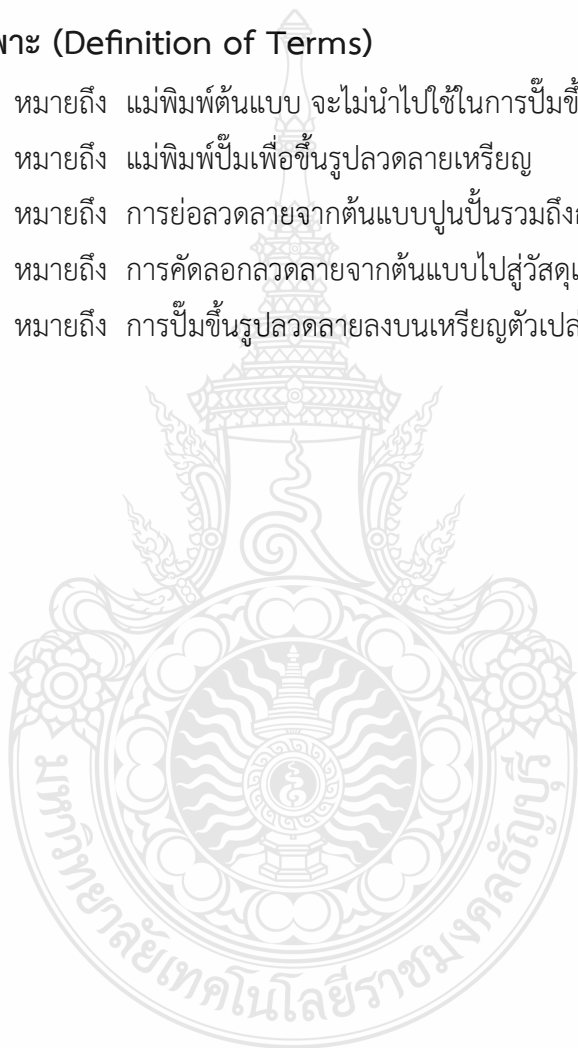
1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย

1.7.1 ต้องควบคุมและไม่เปลี่ยนแปลงรายละเอียดลวดลายเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท

1.7.2 ดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนมีข้อระเบียบควบคุมการเก็บรักษา และไม่สามารถนำดวงตราออกนอกโรงกษาปณ์เพื่อตรวจสอบรายละเอียดได้

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ (Definition of Terms)

แม่ตรา	หมายถึง แม่พิมพ์ต้นแบบ จะไม่นำไปใช้ในการปั๊มขึ้นรูปลวดลายเหรียญ
ดวงตรา	หมายถึง แม่พิมพ์ปั๊มเพื่อขึ้นรูปลวดลายเหรียญ
การย่อลาย	หมายถึง การย่อลวดลายจากต้นแบบปูนปั้นรวมถึงการผลิตแม่ตราต้นแบบ
การถอน	หมายถึง การคัดลอกลวดลายจากต้นแบบไปสู่วัสดุหลักอีกชิ้นหนึ่ง
ตีตรา	หมายถึง การปั๊มขึ้นรูปลวดลายลงบนเหรียญตัวเปล่าด้วยเครื่องปั๊มเฉพาะ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหรียญ 10 บาท

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท รัชกาลที่ 10 ด้านหน้าเป็นภาพพระบรมฉายาลักษณ์พระบาทสมเด็จพระวชิรเกล้าเจ้าอยู่หัว และด้านหลังเป็นอักษรพระปรมาภิไธย วปร ภายใต้พระมหาพิชัยมงกุฎบนเหรียญโลหะสองสีในรูปแบบวงแหวน ที่ประกอบด้วยโลหะผสมสองชนิด วงนอก (Outer Ring) เป็นโลหะผสมคิวโปรนิกเกิล(ทองแดง 75% และนิกเกิล 25%) และวงใน (Inner Disk) เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมบรอนซ์ (ทองแดง 92% อะลูมิเนียม 6% และนิกเกิล 2%) ประกอบติดกันในลักษณะ Pre-fitted ซึ่งมีรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 10 บาท ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 10 บาท

เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก	25.60 ± 0.05 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน	18.15 ± 0.10 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	8.50 ± 0.20 กรัม
ความแข็ง	70 - 100 HV10

2.2 โลหะทองแดง

แร่ทองแดงเป็นธาตุที่มีสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ หรือพบในสภาวะที่เป็นโลหะ (Metallic state) หรือสภาพ Native copper จะกระจายตามแหล่งต่างๆ ซึ่งในยุคบรอนซ์เป็นยุคที่มนุษย์สามารถนำแร่ทองแดงและแร่ดีบุกมาถลุงในเตาที่ใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง ทำให้ได้โลหะผสมทองแดงกับดีบุกซึ่งเรียกว่าบรอนซ์ สำหรับประเทศไทยพบเครื่องประดับที่สร้างขึ้นด้วยโลหะบรอนซ์ที่บ้านเชียง มีอายุประมาณ 6,000-7,000 ปี แร่ทองแดงที่พบมีมากมายหลายที่อยู่ในรูปแบบของออกไซด์ ซัลไฟด์ ซัลเฟต ซิลิเกต คาร์บอเนต และที่ผสมกันอยู่ตามแร่ธาตุต่างๆ เช่น แร่เงิน พลวง นิกเกิล ซึ่งปริมาณของทองแดงจะมีผสมอยู่ไม่เกิน 10% ทำให้แร่ทองแดงมีความสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ [12]

การถลุงแร่ทองแดง และสกัดสิ่งแปลกปลอมออก เพื่อให้ทองแดงมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยนำไปผ่านขั้นตอนโรสต์ติ้ง (Roasting) เพื่อให้ทองแดงซัลไฟด์เป็นทองแดงออกไซด์ แล้วนำไปหลอมละลาย ซึ่งมีส่วนผสมของทองแดงซัลไฟด์ และเหล็กซัลไฟด์ปนกันอยู่เรียกว่า ทองแดงเมตต์ (Copper matte) และเข้าขั้นตอนสกัดให้ทองแดงมีความบริสุทธิ์ขึ้นมากกว่าเดิมด้วยเตาคอนเวอร์เตอร์

(Converter) โดยใช้ออกซิเจนเข้าไปในทองแดงเมตต์ เพื่อให้เหล็กซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีสแลกเหล็กออกไซด์เป็นส่วนที่เหลือ จากนั้นนำทองแดงที่เป็นแท่งเป็นทองแดงที่ไม่บริสุทธิ์ เรียกว่า ทองแดงบลิสเตอร์ (Blister copper) แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการวิธีอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic refining) หรือโดยวิธีการใช้ความร้อน (Fire refining) ทองแดงที่ได้จากการแยกด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ เรียกว่า ทองแดงทัพพิตซ์ (Tough-pitch copper) ในขั้นตอนนี้ทองแดงที่ได้สามารถนำไปใช้งานต่างๆ ทั่วไปได้ เช่น ทำเป็นแผ่นทองแดง หรือท่อทองแดง แต่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้จะมีความต้านทานสูง หากต้องการลดออกซิเจนลงต้องหลอมอีกครั้ง ต้องหลอมภายในเตาควบคุมบรรยากาศ และควบคุมกระบวนการให้ออกซิเจนไม่เกิน 0.03% [13]

2.3 อะลูมิเนียม [12]

อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีความหนาแน่นน้อย หรือเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติด้านการเกิดสนิม มีความแข็งแรงปานกลางแต่มีความเหนียวสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้าน ทางอุตสาหกรรม หรืองานทางด้านวิศวกรรมได้ต่างๆ มากมาย อีกทั้งในด้านการหลอมโลหะอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำ และสามารถไปผสมกับโลหะอื่นๆ ได้ง่าย แต่อะลูมิเนียมนั้นมีการยืดหยุ่น (Elastic limit) ค่อนข้างต่ำ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ความหนาแน่น (20 °C)	2.70 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	658 °C
ความร้อนจำเพาะ (0-100 °C)	0.2259 Cal/g °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20 °C)	23.8 10 ⁻⁶ /°C
สภาพการนำความร้อน	0.52 Cal.cm/cm ² .°C,sec

คุณสมบัติเชิงกล

ความแข็งแรง (Tensile Strength)	8-10 kg/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	3 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40-45%
ความแข็ง (Hardness)	16-20 H _B
โมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	7,800 kg/mm ²

อะลูมิเนียมมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ที่ทำให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานการเกิดสนิม ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับออกซิเจน ซึ่งมีความหนาแน่นมากทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมได้ และด้วยคุณสมบัติของอะลูมิเนียมที่สามารถยืดตัวได้ดี จึงทำให้สามารถขึ้นรูปงานทั้งด้านการรีดเป็นแผ่น หรืออัดขึ้นรูปต่างๆ ได้ดี

2.4 นิกเกิล (Nickel) [12]

นิกเกิลเป็นธาตุที่มีปริมาณมากในแหล่งสำคัญในประเทศแคนาดา และแถบภาคกลางของประเทศไทย แร่ นิกเกิลจะอยู่ในรูปที่ปะปนอยู่กับทองแดง โคบอลต์ และแร่โลหะของกลุ่มแพลทินัม แร่ นิกเกิลที่พบจะมีนิกเกิลอยู่ประมาณ 0.8-5.5% ที่เหลือจะประกอบด้วแร่อื่นๆ การถลุงแร่ นิกเกิลนั้นมีหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะแร่ที่ขุดมาได้ เช่น การแยกโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Separation) และการลอยแร่ (Floatation) แต่ยังคงต้องผ่านกระบวนการอีกหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้นิกเกิลที่บริสุทธิ์

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่สูง มีสีขาว มีความเหนียวและอ่อนตัวสูง สามารถนำไปขึ้นรูปเย็นได้ง่ายและยังสามารถละลายผสมกับโลหะอื่นๆ ได้ง่าย ทำให้ปริมาณการใช้งานประมาณ 60% จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม และในส่วนอื่นๆ จะนำไปใช้ในงานเฉพาะทางที่กัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลจะเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ความหนาแน่น (20 °C)	8.89 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	1,435-1,445 °C
ความร้อนจำเพาะ (27-100 °C)	0.130 Cal/g °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (27-100 °C)	$13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
สภาพการนำความร้อน	0.145 Cal.cm/cm ² .°C.sec

คุณสมบัติเชิงกล

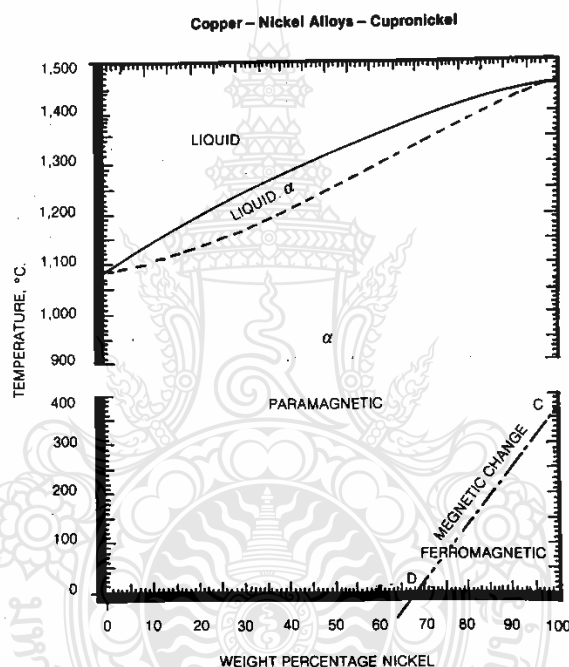
ความแข็งแรง (Tensile Strength)	47 kg/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	15 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40 %
ความแข็ง (Hardness)	110 HB
โมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	21,000 kg/mm ²

2.5 โลหะผสมทองแดงนิกเกิล (Cupronickel) [12]

โลหะผสมทองแดงนิกเกิล เป็นโลหะผสมประเภทเฟสเดียว (Solid Solution) เนื่องจากนิกเกิลสามารถละลายได้ดีในโลหะทองแดง และเมื่อมีการผสมนิกเกิลลงในทองแดงตั้งแต่ 10-15 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้สีของทองแดงเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อโลหะเป็นสีเงิน ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของทองแดงผสมนิกเกิลจะมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปได้ทั้งขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปเย็น และต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะน้ำเกลือ และไม่เกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical corrosion)

โดยทั่วไปแล้วโลหะผสมทองแดงนิกเกิลอาจมีโลหะธาตุผสมอยู่จำนวนหนึ่ง เช่น แมงกานีส เหล็ก และอะลูมิเนียม เป็นต้น เพราะในการหลอมมีการใช้แมงกานีส เพื่อไล่แก๊สออกซิเจนและ ดึงกำมะถันออก เพื่อไม่ให้ทองแดงนิกเกิลมีคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง ดังนั้นควรมีการผสมของ แมงกานีสคงเหลืออยู่ไม่เกิน 1-2 % และในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนจะผสมเหล็ก ระหว่าง 1-2 % และมีอะลูมิเนียมประมาณ 2-3 % เพื่อปรับคุณสมบัติให้การชุบแข็งโดยการตกผลึก

จากแผนภูมิสมดุลของโลหะผสมทองแดงนิกเกิล รูปที่ 2.1 จะเห็นว่าโลหะนิกเกิลสามารถ ละลายได้ดีในเฟสสารละลายของแข็งในทุกอัตราส่วนผสมนิกเกิล โดยเฟสแอลฟามีผลึกเป็นแบบ FCC และมีเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแม่เหล็ก (Curie Line) ตัดเส้นอุณหภูมิปกติที่ 68.5%Ni



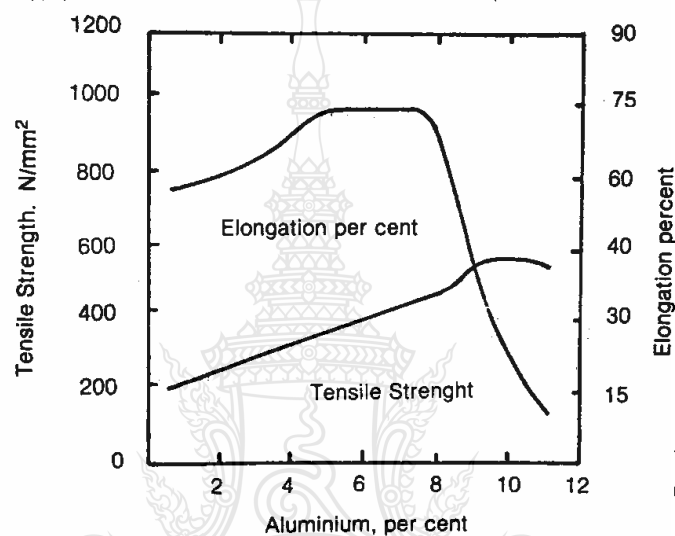
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมทองแดงนิกเกิล[12]

2.6 บรอนซ์อะลูมิเนียม (Aluminium bronze)

บรอนซ์อะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงและอะลูมิเนียม มีความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียวสูง มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้อุณหภูมิสูงถึง 400 °C สามารถทำการชุบแข็งและ อบคืนตัวคล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอนได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้บรอนซ์อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้งาน ในด้านวิศวกรรมที่แพร่หลาย

จากสถาบันมาตรฐาน ASTM บรอนซ์อะลูมิเนียม คือ โลหะที่ผสมทองแดงกับอะลูมิเนียม โดยมีอะลูมิเนียมผสมอยู่ระหว่าง 5-15% และอาจมีเหล็กผสมอยู่ 10% และให้มีแมงกานีสหรือนิกเกิลผสมได้ และซิลิคอนผสมได้ไม่เกิน 0.5%

อะลูมิเนียมมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล โดยส่งผลต่อความแข็งแรงดึงและการอัตราการยืดตัวให้สูงขึ้นกว่าเดิม และสามารถมีส่วนผสมอะลูมิเนียมสูงสุดที่ประมาณ 8% จากนั้นคุณสมบัติดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนมากกว่า 8% รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอัตราส่วนทองแดงผสมอะลูมิเนียม

2.7 การอบชุบทางความร้อน [12]

การอบชุบทางความร้อนให้กับเหล็กกล้า เป็นกรรมวิธีเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็ก รวมถึงโครงสร้างของเหล็ก จึงมีสำคัญและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย

การชุบแข็งเหล็ก (Hardening) คือ กระบวนการให้ความร้อนเหล็กจากอุณหภูมิบรรยากาศปกติให้มีความร้อนอุณหภูมิประมาณ 800-900 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กนั้นๆ โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) โดยปกติแล้วจะให้ความร้อนเหล็กมากกว่าอุณหภูมิเลยเส้น A1 หรือ A3 ไปประมาณ 50-70 °C เพื่อรักษาสภาพเกรนไม่ให้มีขนาดใหญ่โตขึ้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของเหล็กเปลี่ยนแปลงเสียไป และเพื่อรักษาซีเมนไตต์ไว้ไม่ให้เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ เพราะซีเมนไตต์มีความแข็งแรงสูงอยู่แล้ว เมื่อทำการเผาเหล็กจนเป็นเฟสออสเทนไนต์และมีความร้อนจนทั่วชิ้นงานเหล็กแล้วจะนำโลหะออกจากเตาในความร้อน แล้วนำไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มในน้ำ (Water quench) หรือในน้ำมัน (Oil quench) หรือในก๊าซ (Gas quench) ในช่วงขณะที่เหล็ก

เย็นอย่างรวดเร็วนั้นออสเทนไนท์จะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพอร์ไลต์ (Pearlite) ไม่ทัน แต่จะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ขึ้นแทน ซึ่งทำให้เหล็กมีความแข็งมากขึ้น

โลหะเหล็กเมื่อการให้ความร้อนและลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะเกิดความเครียด (Strain) เกิดขึ้นภายใน มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น และความเหนียวลดลง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน มีความเปราะ จึงควรนำเหล็กไปปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กโดยทำการอบคืนไฟ (Tempering)

2.8 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ (Physical vapor deposition : PVD) [14]

การชุบเคลือบผิว PVD เป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลจากแหล่งกำเนิดไอความร้อน (Target) ไปถึงสารตั้งต้น (Substance) โดยไม่เกิดการชนกันด้วยโมเลกุลของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในห้องสะสม กระบวนการ PVD ประเภทนี้จำเป็นต้องมีสุญญากาศค่อนข้างดี การรักษาสุญญากาศโดยปกติต้องใช้สุญญากาศที่ต่ำกว่า 10^{-4} Torr ซึ่งที่ความดันนี้ยังคงมีก๊าซอยู่เป็นจำนวนมาก โดยการปะทะกันบนพื้นผิวชิ้นงานกับก๊าซตกค้างอาจก่อให้เกิดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ขึ้นได้ เช่น การปนเปื้อนของฟิล์มเคลือบผิว หากเกิดปัญหาการปนเปื้อนของฟิล์มจะต้องสร้างสุญญากาศสูงถึง (10^{-7} Torr) หรือสุญญากาศสูงพิเศษ ($<10^{-9}$ Torr) จึงจะสามารถใช้ในการผลิตฟิล์มได้ตามต้องการ ความบริสุทธิ์ของสารเคลือบขึ้นอยู่กับอัตราการสะสม ปฏิกิริยาของก๊าซตกค้าง และการสะสมตัวชนิดและระดับสิ่งเจือปนในคราบที่ยอมรับได้

2.8.1 เทคโนโลยีการชุบเคลือบผิว ด้วยเทคนิค Arc Vapor Deposition [14]

เป็นเทคนิคที่ใช้การระเหยของอิเล็กโทรดภายใต้สภาวะอาร์กจากแหล่งของวัสดุที่ใช้เป็นสารเคลือบ ซึ่งสภาวะการอาร์คซึ่ง (Arcing) ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง แรงดันไฟฟ้าต่ำที่ไหลผ่านก๊าซหรือไอของวัสดุอิเล็กโทรด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอาร์คต้องอยู่ใกล้ศักย์ไอออไนเซชันของก๊าซหรือไอเท่านั้น (>25 V) การปลดปล่อยไอออนที่แคโทด และการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ขั้วบวกจะทำให้ขั้วไฟฟ้าร้อนขึ้น ไอวัสดุที่ถูกปล่อยออกมาส่วนใหญ่เป็นอะตอมที่ระเหยด้วยความร้อน แต่บางส่วนถูกดีดออกมาเป็นหยดหลอมเหลวหรืออนุภาคของแข็งจากแคโทด เปอร์เซ็นต์อะตอมที่กลายเป็นไอสูงจะถูกแตกตัวเป็นไอออนในกระบวนการอาร์กกลายเป็นไอ เนื่องจากมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง และการอาร์คสามารถเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่มีระยะห่างใกล้เคียงกันได้ดีในสภาวะสุญญากาศที่ดี โดยการระเหยวัสดุอิเล็กโทรดบางส่วน หรือระหว่างอิเล็กโทรดในสภาพแวดล้อมที่มีก๊าซความดันต่ำหรือสภาพแวดล้อมที่มีก๊าซแรงดันสูง แต่การอาร์คของก๊าซในสภาวะแรงดันสูงไม่ได้ใช้ในการเคลือบ PVD แต่ใช้ในกระบวนการต่างๆ เช่น การชุบแข็งแบบพลาสมา การเชื่อมอาร์ก และการชุบด้วยไฟฟ้า ในการเคลือบผิว PVD การระเหยของการอาร์คถือได้ว่าเป็นแหล่งการระเหยที่มีลักษณะเฉพาะควบคู่ไปกับการกลายเป็นไอดีด้วยความร้อนและการสเปกเตอร์รัง

การกลายเป็นไอส่วนใหญ่มาจากพื้นผิวแคโทดโดยการกัดเซาะของการอาร์ค วิธีนี้จะเรียกว่าแหล่งกำเนิดของการอาร์คแคโทด ซึ่งการอาร์คนั้นอาจต่อเนื่องหรือเป็นจังหวะ และทำให้แคโทดอาจหลอมละลาย แต่โดยทั่วไปแล้วแคโทดจะมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยแหล่งกำเนิดแคโทดที่หล่อเย็นด้วยน้ำเป็นแหล่งอาร์คแคโทดที่พบบ่อยที่สุดสำหรับการเคลือบผิววิธีนี้ การที่จะทำให้การอาร์คนั้นเสถียรคงที่ต้องมีกระแสไฟฟ้าต่ำ ทั้งนี้ขึ้นกับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ทองแดงและไทเทเนียม จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ประมาณ 50–100 A สำหรับวัสดุทนไฟ เช่น ทังสเตน จะใช้กระแสประมาณ 300–400 A แรงดันไฟฟ้าการอาร์คส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นใกล้กับพื้นผิวแคโทด โดยแรงดันไฟฟ้าการอาร์คอยู่ระหว่างประมาณ 15–100 V ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดไปยังแอโนด เช่น การออกแบบแคโทด การกระจายพลังงานในการอาร์ค

2.8.2 เทคโนโลยีการชุบเคลือบผิว ด้วยเทคนิค Sputtering [14]

กระบวนการสปัตเตอร์ริงเป็นการทำให้อะตอมกลายเป็นไอทางกายภาพ ไม่ให้ความร้อนที่พื้นผิวของสารเคลือบ โดยจะถ่ายโอนโมเมนตัมจากการปลดปล่อยอนุภาคขนาดอะตอมที่มีพลังงานมาก ซึ่งไอออนของวัสดุที่เป็นก๊าซเกิดจากการถูกเร่งในสนามไฟฟ้า

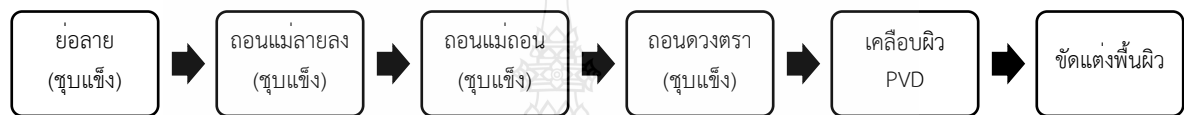
การสะสมสปัตเตอร์คือการสะสมของอนุภาคที่มาจากพื้นผิว (Target) ที่เกิดสปัตเตอร์ การเคลือบผิวด้วยการสปัตเตอร์ได้รับการรายงานครั้งแรกโดยโรทีในปี พ.ศ. 2420 และมีความเป็นไปได้ เพราะจำเป็นต้องใช้สุญญากาศที่ค่อนข้างต่ำเท่านั้น ซึ่งเอ็ดสันจดสิทธิบัตรกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีสปัตเตอร์สำหรับการเคลือบผิวด้วยทองคำบนกระบอกภาพถ่ายขึ้นในปี 1904 แต่การเคลือบผิวสปัตเตอร์ไม่ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมจนกระทั่งมีความจำเป็นในการพัฒนาสำหรับแหล่งการกลายเป็นไอที่สามารถทำซ้ำได้ มีเสถียรภาพ และมีอายุการใช้งานยาวนานเพื่อการผลิต และเป็นการเกิดขึ้นของแมกนีตรอนสปัตเตอร์ประเภทต่างๆ .

การสปัตเตอร์แมกนีตรอนในระนาบซึ่งใช้สนามแม่เหล็ก เพื่อจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้ใกล้กับพื้นผิวเป้าหมายในระนาบ ปัจจุบันเป็นรูปแบบการสปัตเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด โดยทั่วไปแล้วการใช้คำว่าสปัตเตอร์เพียงบ่งชี้ว่าพื้นผิวที่ถูกสปัตเตอร์เป็นแหล่งที่มาของวัสดุที่เคลือบผิว และในบางกรณีมีการกำหนดคำวิธีการสปัตเตอร์ เช่น การสปัตเตอร์ด้วยลำแสงไอออน (ion beam sputtering) การสปัตเตอร์แมกนีตรอน (Magnetron sputtering) การสปัตเตอร์แมกนีตรอนที่ไม่สมดุล (Unbalanced magnetron sputtering : UBS) HIPPS และ RF sputtering เป็นต้น ในบางกรณีอาจมีการระบุเงื่อนไขการสปัตเตอร์แบบพิเศษ เช่น การสปัตเตอร์ปฏิกิริยาสำหรับการเคลือบของฟิล์มผสมหลายสารตั้งต้น หรือการสปัตเตอร์แบบ Bias เมื่อมีการ Bias บนสารเคลือบ เพื่อให้มีการปลดปล่อยไอออนพร้อมกันของฟิล์มที่เคลือบ

การสะสมสปัตเตอร์สามารถทำได้ในสุญญากาศที่ดี (น้อยกว่า 10^{-5} Torr) โดยใช้ลำแสงไอออนในสภาพแวดล้อมของก๊าซที่ความดันต่ำ ทำให้อนุภาคสปัตเตอร์จากสารเคลือบไปยังวัสดุชิ้นงาน โดยไม่มีการชนกันของก๊าซอื่นๆ

2.9 ขั้นตอนการผลิตดวงตราและตราเหรียญกษาปณ์

การขึ้นรูปดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนนั้น จะต้องผลิตมีดวงตราชนิดต่างๆ ซึ่งมีการใช้งานที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ โดยการผลิตดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในชนิดต่างๆ จะมีวิธีการผลิตที่คล้ายกันในบางขั้นตอนเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตดวงตรา

2.9.1.1 แม่ย่อลายหรือดวงตราต้นแบบ (Master Die) ดังรูปที่ 2.4 ได้จากการนำเหล็กเพลาหน้าเรียบที่แกะลวดลายเหรียญด้วยด้วยเครื่องจักร CNC Engraving Machine ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้สร้างลวดลายนั้นมีความละเอียดสูงและแม่นยำสูง เพื่อให้ได้ลวดลายที่มีคุณภาพและมีความสวยงามได้ตามแบบเหรียญที่ถูกกำหนดไว้จากผู้วาดแบบเหรียญและผู้ปั้นแบบเหรียญ



รูปที่ 2.4 แม่ย่อลายหรือดวงตราต้นแบบ



รูปที่ 2.5 เครื่องจักร CNC Engraving Machine

2.9.1.2 เมื่อหล่อได้มีลวดลายเหรียญที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว จะนำไปกลึงปรับรูปทรงให้ได้ตามแบบที่กำหนด และนำไปชุบแข็งและอบคืนไฟ เพื่อให้แม่หล่อลายมีคุณสมบัติทางกายภาพแข็งขึ้น

2.9.1.3 แม่หล่อลงหรือดวงตราลายลง (Master hub) สร้างจากการนำดวงตราต้นแบบ (Master die) นำมากดอัดกับหุ่นแหลม (Cone die) ด้วยขั้นตอนดังรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 36.5 มิลลิเมตร สูง 47 มิลลิเมตร และมุมแหลม 40 องศา เพื่อคัดลอกลวดลายจากลวดลายบนขึ้นให้มีลวดลายที่เป็นนูนลงและลวดลายสลักกลับด้าน หลังจากนั้นจะนำไปกลึงปรับรูปทรงให้ได้ตามแบบที่กำหนด และชุบแข็งและอบคืนไฟตามลำดับ

2.9.1.4 แม่ถอนหรือดวงตรา (Die) สร้างจากการนำดวงตราลายลง (Master hub) นำมากดอัดกับหุ่นแหลม (Cone die) ดังรูปที่ 2.6 เช่นกัน โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร สูง 85 มิลลิเมตร และมุมแหลม 40 องศา เพื่อคัดลอกลวดลายบนลงเป็นลวดลายบนขึ้น หลังจากนั้นจะนำไปกลึงปรับรูปทรงให้ได้ตามแบบที่กำหนด และชุบแข็งและอบคืนไฟตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การถอน

2.9.1.5 ดวงตรา (Working Die) ใช้สำหรับตีตราลงบนเหรียญตัวเปล่า ซึ่งได้จากการนำแม่ถอน (Working die) นำมากดอัดกับหุ่นแหลม (Cone die) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 31.5 มิลลิเมตร สูง 32 มิลลิเมตร และมุมแหลม 80 องศา ด้วยเครื่องเครื่องถอนดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ดังรูปที่ 2.7 เพื่อคัดลอกลงตลอกจากกลดลายหุ่นขึ้นให้มีลวดลายที่เป็นหุ่นลง หลังจากนั้นจะนำไปกลึงปรับรูปทรงให้ได้ตามแบบที่กำหนด และชุบแข็งและอบคืนไฟตามลำดับ

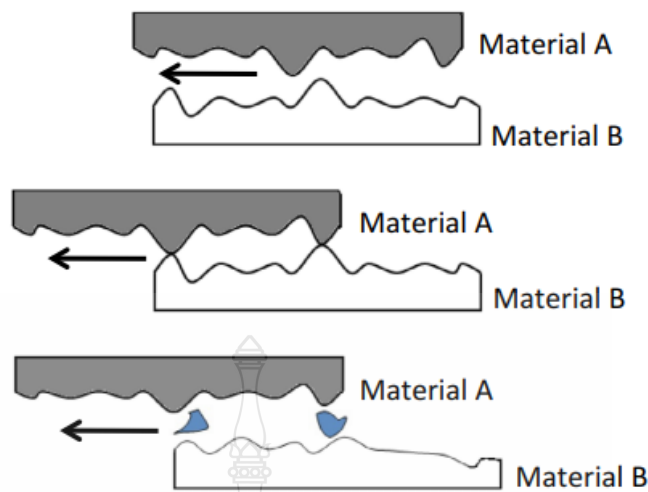


รูปที่ 2.7 เครื่องถอนดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน

2.9.1.6 สำหรับดวงตราทุกชิ้นจะมีการขัดตกแต่งลวดลายเหรียญก่อนและหลังในขั้นตอนการชุบแข็งและอบคลาดเครียด หลังจากนั้นจะนำเข้าสู่กระบวนการชุบเคลือบผิว PVD และขัดด้วยเครื่องขัด Aero-Lap เพื่อให้ได้คุณภาพความเงาที่โรงกษาปณ์กำหนดไว้

2.10 การสึกหรอแบบยึดเหนี่ยว (Adhesion Wear)

การสึกหรอแบบยึดเหนี่ยว (Adhesion Wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจากการสองผิวหน้าของเนื้อวัสดุเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างกันและเนื้อวัสดุแนบติดหรือแตกหลุดออกจากเนื้อวัสดุเดิม ทำให้ผิวหน้าของวัสดุสูญเสียเนื้อโลหะไปให้กับวัสดุคู่สัมผัส โดยในช่วงที่เกิดการสึกหรอจะเกิดอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการสูญเสียผิวหน้าของวัสดุทั้งสองคู่สัมผัสตลอดเวลา ทั้งนี้การเข้ากันได้ระหว่างเนื้อสองชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ของเนื้อโลหะในแต่ละธาตุ เช่น หากโลหะ ก มีความแข็งแรงมากกว่าโลหะ ข ซึ่งทำให้โลหะ ข สูญเสียผิวหน้าสัมผัสหรือแตกออกมาให้แก่โลหะ ก



รูปที่ 2.8 แสดงเสียดสีระหว่างกันกับเนื้อวัสดุ [15]

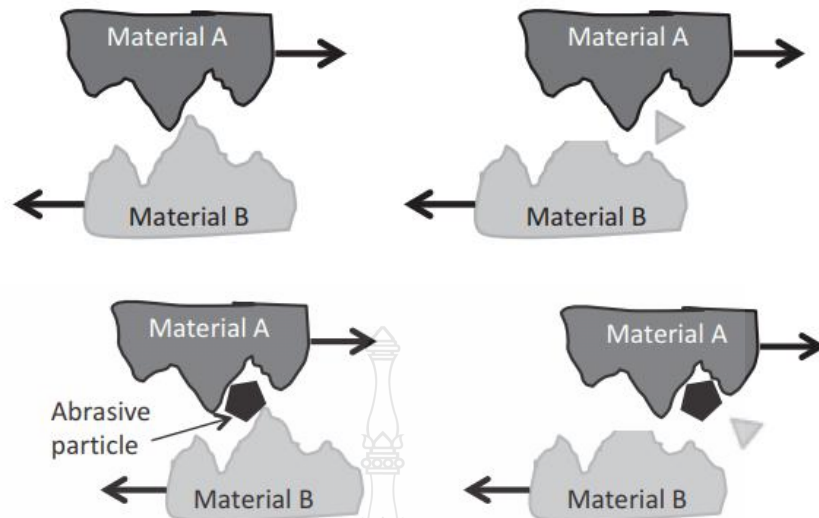
2.11 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear) [16]

การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear) วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ของวัสดุที่มีความแข็งได้เคลื่อนที่ในลักษณะขัดสีที่พื้นผิววัสดุอีกชิ้นหนึ่ง ทำให้ปรากฏความเสียหายต่างๆ ขึ้น ในลักษณะงานประเภท เช่น งานเหมืองแร่ โรงหล่อ เป็นต้น ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในปริมาณมากในการเปลี่ยนชิ้นส่วนในเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย การสึกหรอจากการขัดถุนั้นสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

2.11.1 การสึกหรอ แบบ Gouging Abrasive เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสีในความเค้นที่สูงมาก จะมีแรงชน (Impact Force) ประกอบไปด้วย อาจเกิดในขณะความเร็วที่สูงหรือที่ความเร็วต่ำก็ได้ ทำให้ปรากฏการสึกหรอที่มีลักษณะเป็นร่องขนาดใหญ่ และมีเศษวัสดุหลุดออกมา และจะเรียกร่องที่เกิดขึ้นว่า ร่อง Gouge

2.11.2 การสึกหรอที่มีความเค้นสูง เป็นการเกิดจากการที่ผิววัสดุสองพื้นผิวขัดสีกันที่ความเค้นสูง หรือเกิดความเค้นสูงเฉพาะจุด จนพื้นผิวของวัสดุหลุดออกมาเป็นผง หรือเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ และยังสามารถเกิดการสึกหรอต่อไปได้ เนื่องจากชิ้นส่วนเล็กๆ นั้น จะมีผลกระทบต่อเนื่องเกิดการสึกหรอที่มีความเค้นเฉพาะจุด

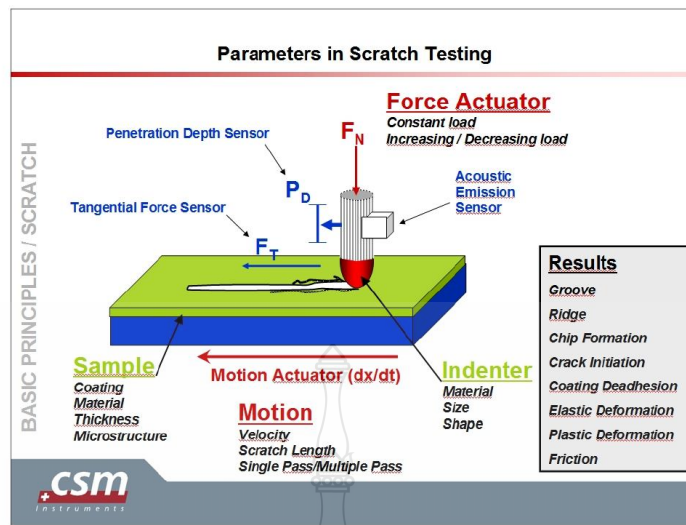
2.11.3 การสึกหรอที่มีความเค้นต่ำ เป็นการสึกหรอในลักษณะที่จุดสัมผัสของวัสดุทั้งสองขัดสีกันที่ความเค้นต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของพื้นผิววัสดุนั้น โดยทั่วไปแล้วเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากเข้าปะทะพื้นผิววัสดุ ทำให้การสึกหรอในประเภทนี้ อาจไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความเหนียวมาก



รูปที่ 2.9 แสดงการสึกหรอจากการขัดถู [15]

2.12 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของสารที่ใช้เคลือบผิว Scratch test [17]

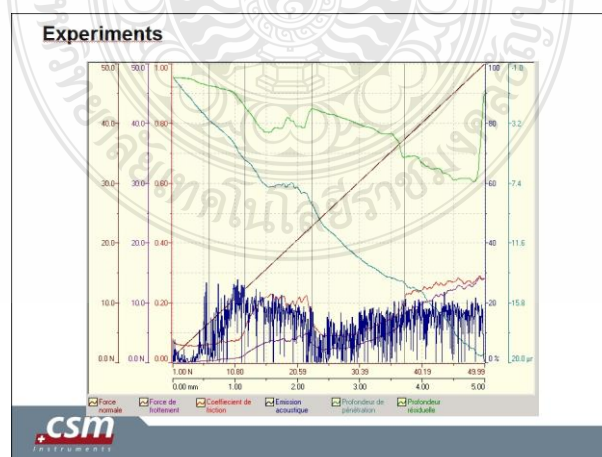
หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการชุบเคลือบผิวแข็ง (PVD) แล้ว ความหนาของชั้นเคลือบจะมีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 ไมโครเมตร การวัดค่า Adhesion โดยวิธี Scratch Test ในปัจจุบันการทำ Scratch Test จะทำในเครื่องมือที่มีความแม่นยำ และเที่ยงตรงสูงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยชิ้นงานจะถูกขีดด้วยหัวทดสอบที่ทำจากเพชรลากและกดไปด้วยความเร็วคงที่ โดยแรงกดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Progressive Load) และในระหว่างการทดสอบนี้ เมื่อถึงแรงกดวิกฤติ (Critical Load, L_c) ค่าหนึ่ง Coating จะเริ่มเสียหาย สามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ออกได้หลายระดับ (เช่น L_{c1} , L_{c2} , ...) จนกว่าจะถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของ Coating โดยสมบูรณ์ (Complete Delamination) ซึ่งค่าที่ทำให้เกิด Complete Delamination นี้ ทางอุตสาหกรรม Hard Coatings ถือว่ามีความสำคัญสูงสุดถึงแม้ว่าเครื่องนี้สามารถให้แรงกดสูงสุดได้ 200 N แต่ในทางปฏิบัติแล้ว มักจะตั้งค่าสูงสุดกันไว้ที่ 120 – 150 N เนื่องจาก Hard Coatings หลายๆ ตัวในปัจจุบันมีความแข็งระดับ Super hard (มากกว่า 40 GPa) หรือใกล้เคียง และมีค่า Adhesion สูงมาก หากทำการทดสอบกับ Hard Coatings เหล่านี้บน Substrate ที่แข็งมาก เช่น Tungsten Carbide อาจทำให้หัวเข็มเพชรที่มีราคาสูง เสียหายได้ภายในการทดสอบเพียงไม่กี่ครั้ง



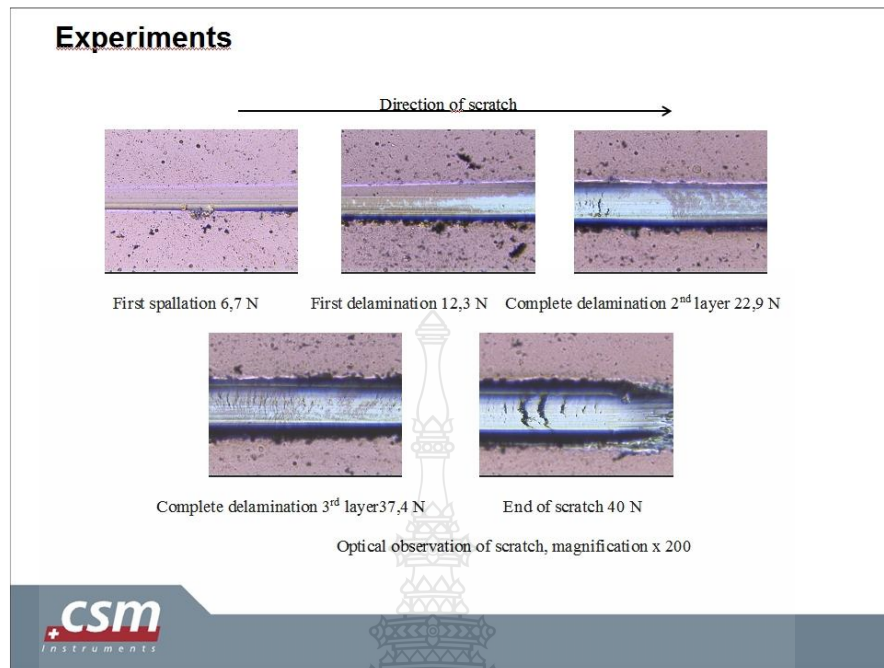
รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทั่วไปของ Scratch Tester

โดยผลลัพธ์ที่ได้มา เพื่อนำไปวิเคราะห์นั้น ได้แก่ ลักษณะของร่องที่เกิดขึ้น รอยนูนหรือ ริวต่างๆ การเกิดขึ้นของสะเก็ดจากผิว ร่องรอยเริ่มต้นของรอยแตก การหลุดลอกของฟิล์ม การคืบตัว และการยุบตัวของพื้นผิวไปจนพฤติกรรมของแรงเสียดทาน ฯลฯ

ปัจจุบันสามารถตั้งโปรแกรมการขีดได้หลากหลาย ไม่เพียงแต่การทำงานในแบบ Progressive Load เท่านั้น ทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการหลุดลอกได้โดยละเอียด เช่น การใช้ แรงกดคงที่ (Constant Load), เพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อย ๆ อย่างสม่ำเสมอ (Progressive Load) และเพิ่ม แรงกดแบบเป็นช่วงๆ (Incremental Load) เป็นต้น [18]



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จาก Sensor ในเครื่อง Scratch Test



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของรอยขีดจากเครื่อง Scratch Test



รูปที่ 2.13 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ที่ได้จากการขีดในแบบต่างๆ [18]

2.13 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

ความเค้นตกค้าง (Residual Stresses) เป็นความเค้นภายในที่ยังคงอยู่ในชิ้นงานโดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งเกิดขึ้นจากประวัติการผลิตของวัสดุ เช่น การหล่อ การขึ้นรูป การอบชุบ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกระบวนการตัดเฉือน ความเค้นเหล่านี้มีลักษณะเป็นแบบหลายแกน (Multiaxial) และอยู่ในสมดุลทางกลภายในชิ้นงาน ความเค้นตกค้างมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการล้า ความต้านทานการกัดกร่อน และความเสถียรของมิติ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนที่มีความน่าเชื่อถือสูงและอายุการใช้งานยาวนาน

กลไกการเกิดความเค้นตกค้างในกระบวนการตัดเฉือนโลหะนั้นมีความซับซ้อน โดยเกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอในชั้นผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ทางความร้อนและทางกล ความร้อนเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงาน และจากการเสียรูปของวัสดุในบริเวณที่ถูกตัด ส่วนแรงกลเกิดจากแรงที่เครื่องมือกระทำต่อผิวของชิ้นงาน ทำให้เกิดการเสียรูปแบบแรงอัดและแรงดึงสลับกันบนชั้นผิวของวัสดุ นอกจากนี้ การเปลี่ยนเฟสของวัสดุอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัดเฉือนก็สามารถส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างได้เช่นกัน

การวัดความเค้นตกค้างสามารถทำได้หลายวิธี โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เทคนิคเชิงกล เช่น Hole-Drilling ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และสามารถใช้กับวัสดุหลากหลายชนิด แต่มีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ทำลายชิ้นงาน เทคนิคการเลี้ยวเบน เช่น X-ray Diffraction และ Neutron Diffraction เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง ไม่ทำลายชิ้นงาน และสามารถวัดความเค้นในระดับจุลภาคได้อย่างละเอียด อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงและต้องการผู้เชี่ยวชาญในการใช้งาน ส่วนเทคนิคอื่นๆ เช่น อัลตราโซนิก แม่เหล็ก และ Raman Spectroscopy ก็มีข้อดีในด้านความเร็วและความสะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะ Raman Spectroscopy ที่สามารถวัดความเค้นในบริเวณที่แคบมากได้อย่างแม่นยำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดและการกระจายของความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ได้แก่ พารามิเตอร์การตัด เช่น ความเร็วตัด (Vc), อัตราป้อน (Feed), ความลึกตัด (Ap) โดยเฉพาะ Feed ซึ่งมีผลมากที่สุดต่อความเค้นตกค้าง นอกจากนี้ รูปทรงของเครื่องมือตัด เช่น รัศมีปลาย มุมตัด และการเคลือบผิวของเครื่องมือก็มีผลต่อการเกิดความเค้นตกค้าง การสึกหรอของเครื่องมือยังส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างแบบแรงดึงเพิ่มขึ้น และทิศทางการไหลของเศษวัสดุ (Chip Flow) ก็มีความสัมพันธ์กับความเค้นตกค้างเช่นกัน โดยสามารถใช้เป็นตัวควบคุมในการออกแบบกระบวนการตัดเฉือนได้

ในกรณีของวัสดุตัดยาก เช่น Inconel, ไทเทเนียม และสแตนเลส ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและความสามารถในการเสียรูปสูง การตัดเฉือนวัสดุเหล่านี้จะเกิดความเค้นตกค้างในระดับสูงและลึกกว่าวัสดุทั่วไป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและลดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน การควบคุมความเค้นตกค้างในวัสดุเหล่านี้สามารถทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์การตัด เช่น ลด Feed หรือเพิ่ม Depth of Cut รวมถึงการใช้พารามิเตอร์ใหม่ เช่น อัตราส่วน F/Ap และมุมตัดเทียบเท่า (Kreq) เพื่อควบคุมทิศทางและขนาดของความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้างมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของชิ้นงาน โดยความเค้นแบบแรงอัดช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการล้า ในขณะที่ความเค้นแบบแรงดึงจะลดความต้านทาน ตัวอย่างเช่น การใช้ EDM ทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลงถึง 35% เมื่อเทียบกับการกัดแบบธรรมดา ดังนั้น การควบคุมความ

เค้นตกค้างจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพสูง โดยต้องพิจารณาทั้ง พารามิเตอร์การตัด รูปทรงของเครื่องมือ และลักษณะของวัสดุอย่างรอบคอบ [19]

2.14 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

การออกแบบการทดลอง เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการวางแผนและดำเนินการทดลอง เพื่อ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมได้ (factors) กับผลลัพธ์ที่ต้องการ (response) โดยมี วัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ให้ได้ตามต้องการ และลด จำนวนการทดลอง ลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ มีจุดมุ่งหมายในการช่วยให้ได้คำตอบ ต่างๆ ของงานวิจัย ซึ่งนักวิจัยได้ออกแบบการวิจัยเพื่อให้มีข้อมูลตามการทดลอง เพื่อนำข้อมูลไป วิเคราะห์ในประเด็นคำถามต่างๆ ด้วยวิธีการสถิติที่ให้ความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือ

2.14.1 การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design)

รูปแบบของ DOE ที่ใช้การพิจารณาปัจจัยทั้งหมดและทุกระดับของปัจจัยนั้น ๆ ใน ทุกการทดลอง โดยการทดลองจะถูกดำเนินการในทุกชุดค่าที่เป็นไปได้ของปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลให้สามารถ ระบุได้ทั้งผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบร่วม (Interaction Effects) ได้อย่างชัดเจน

2.14.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

เครื่องมือทางสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลมากกว่าสองกลุ่ม โดย พิจารณาความแตกต่างของค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มและภายในกลุ่ม ANOVA สามารถช่วยระบุว่า ปัจจัยที่กำลังศึกษามีผลกระทบต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ และเป็นการวิเคราะห์ความ แปรปรวนที่มีปัจจัยอิสระสองปัจจัย ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย รวมถึง ผลกระทบร่วมของทั้งสองปัจจัยได้พร้อมกัน การใช้ Two-way ANOVA ช่วยให้สามารถประเมินได้ว่ามี ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือไม่

2.14.3 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เป็นแนวทางทางสถิติที่ ใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์การทดลองเพื่อให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อ กระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ได้อย่างเป็นระบบ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ลดต้นทุน และเพิ่ม ประสิทธิภาพในการดำเนินงาน การใช้ DOE อย่างถูกต้องจะช่วยให้องค์กรสามารถตัดสินใจบนพื้นฐาน ของข้อมูลที่เชื่อถือได้แทนการใช้วิธีการแบบลองผิดลองถูกแบบเดิม ดังนี้

2.14.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทดลอง ช่วยให้สามารถออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพโดยลดจำนวนการทดลองที่จำเป็นต้องดำเนินการลงได้ โดยใช้แนวทาง เช่น Full Factorial Design, Fractional Factorial Design และ Response Surface Methodology (RSM) ทำให้สามารถศึกษาผลของหลายตัวแปรพร้อมกันโดยไม่ต้องใช้ทรัพยากรมากเกินไป ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการทดลองและลดต้นทุนที่เกี่ยวข้อง

2.14.3.2 การระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการ หนึ่งในข้อได้เปรียบที่สำคัญคือความสามารถในการแยกแยะปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ออกจากปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก DOE ทำให้สามารถกำหนดได้ว่าปัจจัยใดควรได้รับการควบคุมหรือปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

2.14.3.3 การพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยช่วยให้สามารถระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิต ลดข้อผิดพลาด และเพิ่มความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้วัตถุดิบ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว

2.14.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร (Interaction Effects) ไม่เพียงแต่ช่วยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว ๆ เท่านั้น แต่ยังสามารถศึกษาผลกระทบร่วมกันของปัจจัยหลายตัวได้ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ช่วยให้ให้นักวิจัยและวิศวกรสามารถออกแบบกระบวนการที่มีเสถียรภาพมากขึ้นและสามารถปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.14.3.5 การเพิ่มความสามารถในการพยากรณ์และปรับปรุงกระบวนการ โดยผลลัพธ์ที่ได้จาก DOE สามารถนำไปใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย (Regression Equations) เพื่อช่วยทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการในอนาคต ซึ่งช่วยให้สามารถทำ Optimization ของกระบวนการได้โดยหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้จริง

2.14.3.6 การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยแนวทางของ DOE สามารถลดการใช้ทรัพยากรที่ไม่จำเป็น และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองที่เหมาะสมช่วยลดจำนวนวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ลดต้นทุนทางเวลา และลดภาระงานของพนักงาน

2.14.3.7 การสนับสนุนการตัดสินใจโดยใช้ข้อมูลเชิงสถิติ ช่วยให้องค์กรสามารถตัดสินใจโดยอาศัยข้อมูลที่เป็นระบบและมีหลักฐานรองรับแทนการใช้การคาดเดาหรืออาศัยประสบการณ์ส่วนบุคคล วิธีการทางสถิตินี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ ลดความเสี่ยงจากความไม่แน่นอน และทำให้สามารถคาดการณ์แนวโน้มของกระบวนการได้ดีขึ้น

2.14.3.8 การลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ ซึ่งการออกแบบการทดลองที่ดีช่วยลดข้อผิดพลาดเชิงระบบและข้อผิดพลาดจากการสุ่ม (Random Errors) ที่อาจเกิดขึ้นในการทดลอง ทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อทั้งงานวิจัยและการดำเนินงานจริง

2.14.3.9 การประยุกต์ใช้ในหลายสาขา ด้วยการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การผลิตและวิศวกรรมใช้เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การแพทย์และเภสัชศาสตร์ใช้สำหรับการวิจัยทางการแพทย์และการทดลองยา การตลาดและธุรกิจ ใช้เพื่อทดสอบผลลัพธ์ของกลยุทธ์ทางการตลาดและการออกแบบผลิตภัณฑ์ การเกษตรและอาหารใช้ในการเพิ่มผลผลิตและปรับปรุงกระบวนการผลิตอาหาร

ดังนั้น การออกแบบการทดลอง (DOE) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิจัยและพัฒนาในหลายสาขา โดยช่วยให้สามารถเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ลดต้นทุนและระยะเวลาในการทดลอง และเพิ่มความสามารถในการพยากรณ์และปรับปรุงกระบวนการในอนาคต การนำ DOE มาใช้จึงเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กร และส่งเสริมความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างเป็นระบบ

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Torsakul S. และ Kuptasthien N. (2024) งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราปั๊มเหรียญในกระบวนการผลิตเหรียญ โดยเปรียบเทียบวัสดุดวงตราสามชนิด ได้แก่ เหล็กเครื่องมือผสม เหล็กงานเย็น และเหล็กงานร้อน ร่วมกับการเคลือบผิวด้วย TiN และ CrN ด้วยเทคนิค PVD ผลการทดลองพบว่าเหล็กงานร้อนที่เคลือบ CrN ให้ประสิทธิภาพสูงสุด สามารถผลิตเหรียญได้เฉลี่ยถึง 1,300,000 เหรียญต่อชุดดวงตรา ซึ่งมากกว่าเหล็กเครื่องมือผสมที่ผลิตได้เพียงประมาณ 600,000 เหรียญ การเคลือบ CrN ยังให้ความแข็งแรงของชั้นเคลือบและการยึดเกาะที่ดีกว่า TiN ลดการสึกหรอและการหลุดลอกของผิวเคลือบได้มากกว่า ส่งผลให้คุณภาพเหรียญดีขึ้นและลดต้นทุนการผลิต โดยสรุป การเลือกใช้เหล็กงานร้อนร่วมกับการเคลือบ CrN เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราปั๊มเหรียญในอุตสาหกรรมผลิตเหรียญหมุนเวียนของไทย [20]

Carneiro, E. และคณะ (2021) งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเคลือบผิวชนิด Cr(Al,Si)N เพื่อใช้แทนการชุบโครเมียมหกว่าเลนส์ในดวงตราผลิตเหรียญ ในการเคลือบสารบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

พบว่า การเติมอะลูมิเนียมและซิลิกอนลงในโครงสร้าง CrN ช่วยเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อแรงกระแทก โดย CrAlN มีความสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียวมากที่สุด สามารถทนต่อแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้โดยไม่เกิดรอยร้าวหรือการลอกของสารเคลือบ แม้ในสภาวะที่มีแรงกระแทกสูงกว่าที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตเหรียญ [21]

AY Adesina และคณะ (2019) ศึกษาคุณสมบัติของสารเคลือบ AlCrN และพบว่ามีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่าสารเคลือบไนไตร TiN และ CrN โดยให้การปรับปรุงความทนต่อการสึกหรอที่แรงกดปกติสูงถึง 68%, 67% และ 55% ที่ 15, 20 และ 25 N ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ TiN และ CrN ความได้เปรียบของ AlCrN มาจากการก่อตัวของชั้น tribo-oxide ที่ช่วยลดการสึกหรอและเพิ่มความต้านทาน ในขณะที่ TiN และ CrN แม้จะมีแรงยึดเกาะที่ดี แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวด้วยแรงดึง ข้อจำกัดของ AlCrN คือพื้นผิวหยาบและความต้านทานต่อการเสียดสีต่ำกว่า แต่โดยรวมถือเป็นสารเคลือบที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่า TiN และ CrN และเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น [22]

Montwedi และคณะ (2024) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของสารเคลือบ AlCrN มีความแข็ง 2371 ± 250 HV ซึ่งสูงกว่า TiN ที่มีความแข็ง 1991 ± 211 HV นอกจากนี้ AlCrN ยังมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่า (0.3543×10^{-4} mm³/Nm-1) เมื่อเทียบกับ TiN (0.6365×10^{-4} mm³/Nm-1) และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย (COF) ต่ำกว่า (0.456 สำหรับ AlCrN เทียบกับ 0.514 สำหรับ TiN) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า TiN มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีตำหนิในรูปของรูเข็ม ส่วน AlCrN มีลักษณะที่ค่อนข้างหนาแน่นและต่อเนื่อง โดยมีขนาดเกรนเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ TiN ซึ่งเกิดจากการยับยั้งการเติบโตเนื่องจากอะลูมิเนียมและโครเมียม โดยสรุป AlCrN แสดงประสิทธิภาพทางกลโดยรวมที่ดีกว่า TiN ในแง่ของความแข็งที่สูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่า และความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีกว่า [23]

Dalibon และคณะ (2024) พบว่าในการประเมินพฤติกรรมการสึกหรอของสารเคลือบ TiAlN และ AlCrN ที่ใช้เทคนิค PVD บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI ซึ่งทั้งคู่มีความหนาประมาณ 3 ไมโครเมตรนั้น สารเคลือบ AlCrN มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า TiAlN อย่างชัดเจนภายใต้สภาวะการเลื่อน (pin-on-disk) โดยสูญเสียปริมาตรน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่า ในขณะที่การสึกหรอแบบขีดข่วน (abrasive wear) ทั้งสองแสดงผลใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบรอยขีดข่วน (scratch test) AlCrN สามารถทนต่อการระลอกได้สูงกว่า และไม่แสดงการหลุดลอกของฟิล์ม ซึ่งคุณสมบัติที่เหนือกว่านี้คาดว่ามาจากความต้านทานการแตกหักและความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้นของ AlCrN ส่งผลให้ทั้งคู่คุณสมบัติเชิงกลและการยึดเกาะกับพื้นผิวดีขึ้นด้วย [24]

Özkan และคณะ (2018) ศึกษาพฤติกรรมทางทริโบโลยีของสารเคลือบ TiAlN, AlTiN และ AlCrN ที่มีความหนาประมาณ 3.5 ไมโครเมตร ซึ่งถูกเคลือบบนพื้นผิวเหล็ก H13 โดยใช้วิธีการเคลือบแบบ Cathodic arc physical vapor deposition (CAPVD) เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและลดแรงเสียดทานภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบขอบเขต (Boundary lubrication) ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดการสัมผัสระหว่างโลหะโดยตรงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน การทดลองใช้เครื่อง Tribometer แบบ Ball-on-disk โดยใช้ลูกบอลอลูมินาเป็นตัวทดสอบกับสารเคลือบทั้งสามชนิดที่อุณหภูมิ 100°C พร้อมน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง ZDDP เพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของเครื่องยนต์ ผลการทดลองพบว่า AlCrN มีค่าความเสียดทานต่ำที่สุด (COF = 0.08) และมีปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ TiAlN และ AlTiN รวมถึงเหล็กเปล่า [25]

Denkena และคณะ (2020) ศึกษาผลของการเตรียมพื้นผิวแบบต่าง ๆ ทั้งทางกลและเคมีต่อการยึดเกาะของสารเคลือบ CrAlN บนเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด AISI M3:2 ที่ผ่านการอบชุบ โดยเปรียบเทียบผลของการขัดด้วยหัวเจียร การขัดเงา และการไนไตรดิงต่อความเคียดตกค้าง (Residual stress) และความขรุขระของพื้นผิวก่อนและหลังการเคลือบ PVD พบว่าการขัดด้วยหัวเจียร Toric และการไนไตรดิงสามารถสร้างความเคียดตกค้างแบบอัด (Compressive residual stress) ซึ่งช่วยเพิ่มการยึดเกาะของสารเคลือบได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การขัดเงาทำให้เกิดความเคียดตกค้างแบบดึง (tensile residual stress) ซึ่งลดประสิทธิภาพการยึดเกาะของสารเคลือบ การทดสอบด้วย Scratch test และ Indentation test ยืนยันว่าพื้นผิวที่ผ่านการขัดด้วยหัวเจียร Toric ให้ผลการยึดเกาะที่ดีที่สุด โดยรอยขีดทำหน้าที่เป็นอุปสรรคต่อการลอกของสารเคลือบ นอกจากนี้ยังพบว่าความเคียดตกค้างในชั้นเคลือบมีความสัมพันธ์กับความเคียดในวัสดุฐาน และการเปลี่ยนแปลงของความเคียดในบริเวณรอยต่อมีผลต่อการลอกของสารเคลือบ สรุปได้ว่าการขัดด้วยหัวเจียร Toric เป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถทดแทนการไนไตรดิงได้ในการเพิ่มการยึดเกาะของสารเคลือบ CrAlN บนเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการอบชุบ [26]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ดำเนินการเลือกใช้วัสดุวงตราเหรียญ 10 บาท

ด้วยขั้นตอนการผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท ตั้งแต่กระบวนการผลิตวงตรา จนกระทั่งขั้นตอนการตีตราเหรียญได้ใช้งานเครื่องจักรภายในกองกษาปณ์ โดยมีข้อจำกัดในด้านการจัดซื้อวัตถุดิบในการผลิตวงตรา ดังนั้นผู้วิจัยจึงดำเนินการเลือกใช้เหล็กด้วยเกรดเหล็กที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่ใช้งานในปัจจุบัน และพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งานให้สามารถเข้าได้กับเงื่อนไขของการขึ้นรูปวงตราและการใช้เครื่องตีเหรียญและกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในการผลิตวงตราและการตีเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนด้วยความเร็วในการตีตรา 700-750 เหรียญต่อนาที ทั้ง 2 ขั้นตอนเป็นการขึ้นรูปโลหะแบบเย็น ซึ่งต้องอาศัยวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย สามารถชุบแข็งที่ได้ค่าความแข็งถึง 58-60 HRC พร้อมคุณสมบัติความเหนียวที่เหมาะสม เพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและไม่ให้เกิดการแตกร้าวของตัววงตราในการถอนขณะคัดลอกกลวด้วยแรงกดประมาณ 180 ตัน และขณะตีตราเหรียญด้วยแรงกดประมาณ 80 ตัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องคัดเลือกวัสดุเหล็กทั้งหมด 3 ชนิด เกรดเหล็ก ดังนี้

3.1.1 เกรด X110CrMoV8-2-1 ISODUR เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมมากถึง 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผ่านกระบวนการ Electro-X90CrMoV7-2ag Remelting เกรด ESR ด้วยเทคโนโลยีการหลอมซ้ำ ช่วยให้มั่นใจได้ถึงการแยกชั้นในระดับจุลภาคและมหภาคที่ต่ำที่สุด รวมถึงความบริสุทธิ์และความสม่ำเสมอภายในเนื้อโลหะที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าโครเมียม 12% ทั่วไป เกรดเหล็กดังกล่าวมีความเหนียวที่ดีกว่า และความต้านทานต่อการสึกหรอที่สูง ปัจจุบันใช้ผลิตวงตราในกลุ่มเหรียญที่ระลึก และของสังฆภัณฑ์

3.1.2 เกรด X90CrMoV7-2 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือผสมอัลลอยด์สูงที่ผสมโครเมียมมากถึง 7.8 เปอร์เซ็นต์ พร้อมคุณสมบัติที่ใช้งานได้หลากหลาย และยังเป็นเหล็กที่ตีมากสำหรับการปรับสภาพพื้นผิวทุกประเภท ปัจจุบันใช้ผลิตวงตราหมุนเวียนในชนิดราคา 2 บาท 5 บาท และ 10 บาท

3.1.3 เกรด X140CrVW6-3-3 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประสิทธิภาพสูงพร้อมคุณสมบัติที่เหมาะสม ผลิตโดยใช้เป็นเทคโนโลยีวัสดุผง (Powder Metallurgy) เหล็กกล้าเครื่องมือชนิดผงที่มีการผสมผสานที่โดดเด่นระหว่างความต้านทานการสึกหรอ แรงอัด ความเหนียว และความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีมาก ปัจจุบันใช้ในการผลิตวงตราเฉพาะงานที่ต้องการแรงขึ้นรูปที่ค่อนข้างสูง และมีลวดลายที่ต้องการความต้านทานพิเศษ

เกรดเหล็กทั้ง 3 ชนิด มีคาร์บอนที่แตกต่างกัน และในแต่ละชนิดเกรดจะประกอบด้วยธาตุหลักประกอบ ตามตามรางที่ 3.1 เพื่อศึกษาความเหมาะสมกับการตีตราเหรียญชนิดราคา 10 บาท โดยเกรดเหล็กดังกล่าวสามารถผลิตโดยวิธีการถอน (Hobbing) ลวดลายเป็นดวงตราเหรียญหมุนเวียนได้ และยังมีเกรดที่ทางผู้วิจัยได้พิจารณาออกเหนือจากนี้ แต่มีข้อจำกัดด้วยระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. ๒๕๖๐ ซึ่งต้องหาผู้ประกอบการที่มีคุณสมบัติตรงตามเงื่อนไขที่หน่วยงานของรัฐกำหนดไม่น้อยกว่า ๓ ราย จึงเป็นข้อจำกัดการเลือกใช้วัสดุเกรดเหล็กในการทดลองวิจัย อีกทั้งเกรดเหล็กบางชนิดที่ได้รับอนุญาตตัวอย่างจากผู้ผลิตและทำการทดลองแล้วผลพบว่าบางเกรดเหล็กไม่สามารถนำมาใช้ได้ในช่วงขั้นตอนการถอนได้ เนื่องจากขั้นตอนการขึ้นรูปลวดลายได้ไม่เพียงพอหรือลวดลายและพื้นผิวมีคุณภาพไม่ได้ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และบางเกรดเหล็กพบอายุการใช้งานที่สั้นเมื่อนำดวงตราไปใช้งานจริง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเหล็กทำดวงตราเหรียญ 10 บาท

เกรดเหล็ก	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	อื่นๆ
X110CrMoV8-2-1	1.1	0.9	0.4	8.3	2.1	0.5	-	-	Al, Nb
X90CrMoV7-2	0.9	0.9	0.5	7.8	2.5	0.5	-	-	-
X140CrVW6-3-3	1.4	-	-	6.4	1.5	3.7	3.5	-	Nb

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองชิ้นงาน

3.1.1 ตัดวัสดุเหล็กแต่ละเกรดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน (Band Saw) และกลึงขึ้นรูปให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 32 มิลลิเมตร มีความยาว 32 มิลลิเมตร และกลึงปรับรูปทรงให้ด้านหนึ่งเป็นทรงกรวยด้วยมุมแหลม 80 องศา รูปที่ 3.1 จากนั้นนำมาขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย และตามด้วยการขัดผิวแบบล้อผ้าทาด้วยสารขัดเงาโลหะจนกระทั่งเกิดความเงาและให้มีความหยาบอยู่ในเกณฑ์ควบคุมคุณภาพ



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานหุ่นเหล็ก

3.1.2 เมื่อทำความสะอาดชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว รูปที่ 3.2 ชิ้นงานจะถูกนำมาขึ้นรูปพลวดลายด้วยวิธีการถอน (Hobbing) โดยใช้เครื่องกัดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Sack & Kiesselbach รุ่น EP 630/30 รูปที่ 3.3 กัดด้วยแรงขนาด 180 ตัน และนำชิ้นงานที่มีพลวดลายกลึงให้ได้รูปร่างตามแบบที่กำหนด รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดดวงตรา



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดไฮดรอลิก



รูปที่ 3.4 ดวงตราษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท

3.1.3 ตกแต่งพื้นผิวดวงตราให้ได้คุณภาพตามต้นแบบแม่ตรา ด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 400 และลูกขัดสักหลาดพร้อมครีมขัดผิวเพชร 6 ไมครอน หลังจากนั้นล้างชิ้นงานให้สะอาด

3.1.4 นำชิ้นงานเข้าเครื่องอบชุบทางความร้อน (Heat treatment) ยี่ห้อ Schmetz รุ่น IU/IF 11 รูปที่ 3.5 เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะให้มีค่าความแข็งที่เหมาะสมกับการตีตราเหรียญษาปณ์หมุนเวียน โดยเกรดเหล็กแต่ละชนิดมีรายละเอียดขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนในแต่ละเกรด ตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 เครื่องอบชุบด้วยความร้อน Heat Treatment

ตารางที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนในแต่ละเกรดเหล็ก

เกรดเหล็ก	ขั้นตอนการอบชุบทางความร้อน
X110CrMoV8-2-1	อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบคืนไฟที่ 570 °C จำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.
X90CrMoV7-2	อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,050 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบคืนไฟที่ 530 °C จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.
X140CrVW6-3-3	อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C อบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบคืนไฟที่ 550 °C จำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 2 ชม.

เมื่อทำชุบแข็งเสร็จจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของวัสดุโลหะ ซึ่งได้เตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200 และกัดด้วยกรด แล้วจึงนำวัสดุส่องขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่กำลังภาพขยาย 2,300 เท่า พร้อมทั้งตรวจวัดค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในเงื่อนก่อนชุบแข็ง หลังชุบแข็งไม่อบคืนไฟ และหลังชุบแข็งพร้อมอบคืนไฟ

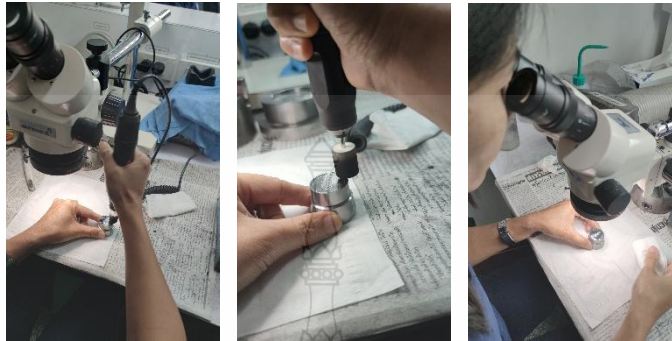
3.1.5 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการการอบชุบทางความร้อนแล้ว จะทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็ง รูปที่ 3.6 โดยวัดในหน่วย HRC ใช้หัวกดเพชรด้วยแรงกดนำ 10N และแรงกดทดสอบ 1,471N ทำการวัด 3 จุดต่อชิ้น ในบริเวณคอและฐานดวงตรา เนื่องจากไม่สามารถวัดในบริเวณกลดลายที่ใช้งานจริงได้



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความแข็ง

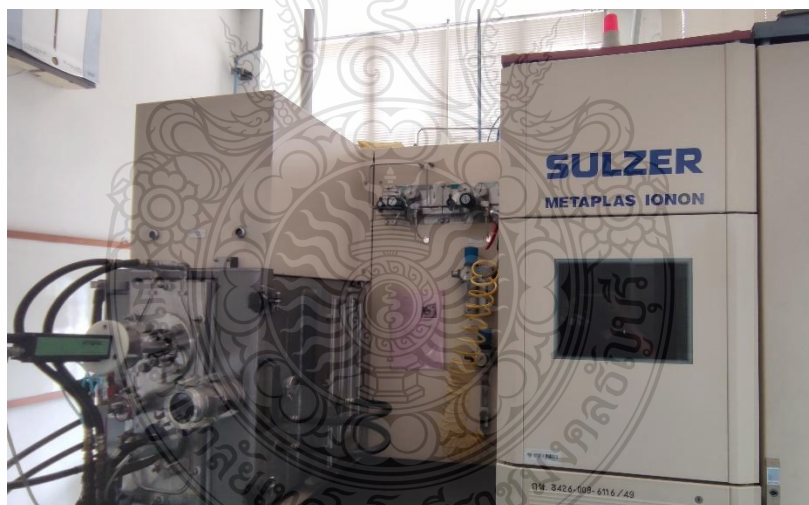
3.1.6 ตกแต่งผิวลวดลายบนชิ้นงานให้มีความเงาให้ได้คุณภาพ (หลังจากชุบแข็ง)

(1) นำดวงตราล้างทำความสะอาดให้สารขัดผิวเงาและคราบน้ำมันต่างๆ หลุดออกจากดวงตราและลวดลายบนเหรียญไม่ให้มีสิ่งเจือปนที่อาจจะทำให้ติดแน่นหลังการชุบเคลือบผิว รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนล้างทำความสะอาดดวงตรา

(2) ทำการชุบเคลือบผิวดวงตรา ด้วยเครื่องชุบเคลือบผิว PVD ยี่ห้อ Metaplas Ionon รุ่น MZR-303U ด้วยสารเคลือบผิวโครเมียมไนไตรด์ (CrN) และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องชุบเคลือบผิว PVD

สำหรับกรณีสารเคลือบผิว AlCrN เจ้าหน้าที่กองกษาปณ์เตรียมพื้นผิวดวงตราให้ผิวชิ้นงานอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปชุบเคลือบผิวได้ และนำดวงตราชุบเคลือบผิวภายนอกโรงกษาปณ์ ณ บริษัทแห่งหนึ่ง ด้วยเครื่องชุบเคลือบ PVD ยี่ห้อ Nissin โดยกองกษาปณ์ได้กำหนดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) เพื่อควบคุมคุณภาพด้านค่าความหนา (Surface Thickness) ค่าความแข็งของผิว

(Coating Hardness) ค่าการยึดเกาะ (Adhesion Test) เช่นเดียวกับเกณฑ์คุณภาพของกษาปณ์ และในการปฏิบัติงานการชุบเคลือบผิว ผู้วิจัยและเจ้าหน้าที่กษาปณ์ผู้ชำนาญการด้านการผลิตดวงตราจะดำเนินการเฝ้าติดตามกระบวนการชุบเคลือบผิวและดำเนินการตรวจดวงตราตั้งแต่ต้นในด้านสภาพผิวอย่างละเอียดจนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการการชุบเคลือบผิว เพื่อให้มีความมั่นใจได้ว่าขั้นตอนการปฏิบัติงานชุบเคลือบผิวมีประสิทธิภาพอยู่ภายในกับการปฏิบัติงานภายในกษาปณ์

การเลือกใช้ชนิดสารเคลือบผิวในการวิจัยครั้งนี้ ได้มีแนวคิดจากในปัจจุบันการผลิตดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท ได้กำหนดวิธีการผลิตให้เคลือบผิวด้วยวิธี PVD ซึ่งเครื่องกษาปณ์มีเครื่องเคลือบผิวสามารถดำเนินการเคลือบผิวได้ด้วยตัวเอง และได้เลือกใช้สารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซึ่งปัจจุบันพบปัญหาการหลุดร่อนของสารเคลือบและปรากฏการสึกหรอเป็นลักษณะลายเส้นกระจายตัว จึงต้องพิจารณาสารเคลือบใหม่ และสารเคลือบต้องมีความเหมาะสมเหรียญที่ระลึก รวมถึงความสวยงาม มีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิม และกษาปณ์มีสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่สามารถดำเนินการเคลือบผิวได้เพิ่มเติม อีกทั้งผู้วิจัยได้รับข้อเสนอจากบริษัทแห่งหนึ่งให้สามารถนำดวงตราเหรียญหมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท ด้วยสารเคลือบผิว AlCrN ด้วยอัตราส่วน Al70% และ Cr30% ซึ่งเป็นสารเคลือบที่กษาปณ์ไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากไม่มีวัสดุสารเคลือบ (Target) และสูตรโปรแกรม (Recipe) สำหรับดำเนินการเครื่องจักรชุบเคลือบผิว PVD จึงได้พิจารณานำดวงตราและชิ้นงานทดสอบทั้งเกรดหลัก 3 ชนิด ชนิดละ 3 ชิ้น นำชุบเคลือบผิว PVD พร้อมกัน

3.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

งานวิจัยในการทดลองจะทำการทดลองโดยใช้ปัจจัยวัสดุหลักและสารเคลือบผิวทุกตัวในการออกแบบการทดลอง (Full Factorial Design) โดยใช้โปรแกรม Minitab ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับร้อยละ 95

3.3.1 การเลือกและกำหนดปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

ด้วยสาเหตุการเกิดปัญหาและข้อจำกัดต่างๆในการวิจัยครั้งนี้ ทำให้สามารถกำหนดปัจจัย (Factor) ได้ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุหลักและสารเคลือบผิว สำหรับปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุมจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ (Constant Value) รายละเอียดแต่ละปัจจัย ดังนี้

(1) วัตถุดิบเหล็ก กระบวนการผลิตในปัจจุบันการเลือกใช้วัตถุดิบสำหรับดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท จะเลือกใช้เหล็กเกรด X90CrMoV7-2 เพียงชนิดเดียว และ จากเหตุผลจากข้อ 3.1 จึงมีวัตถุดิบเหล็กเพิ่มอีกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ X110CrMoV8-2-1 X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3

(2) สารเคลือบผิว กระบวนการผลิตในปัจจุบันการเลือกใช้วัสดุดิบสำหรับดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท จะเลือกใช้สารเคลือบผิวโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเหตุผลการเลือกใช้สารเคลือบข้างต้น จึงมีสารเคลือบผิวทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN)

3.3.2 ค่าตอบสนอง (Response)

สำหรับผลการทดลองและนำผลมาวิเคราะห์ผลการทดลองการตีตราลงบนเหรียญจริงตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ และได้เก็บข้อเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) ได้แก่ การตีตรา (Coining) เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท ลงบนเหรียญตัวเปล่าที่ใช้ในกระบวนการผลิตปัจจุบัน ซึ่งจำนวนเหรียญจะมีค่าเท่ากับจำนวนการตีตรา มีหน่วยนับเป็นจำนวนเหรียญ และยังมีค่าวัดความหยาบผิว (Roughness) ทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของสารที่ใช้เคลือบผิว (Scratch test) และค่าความแข็งผิวเคลือบ (Hardness) และอายุการใช้งาน (Tool life) แต่การทดสอบการยึดเกาะ (Adhesion test) จะไม่นำมาเป็นตัวแปรตามเนื่องจากเป็นการตรวจสอบด้านคุณภาพพื้นผิวการยึดเกาะ

3.3.3 จำนวนการทดลอง (Replicate)

เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้อง และให้ข้อมูลสามารถประมาณค่าความแปรปรวนในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับค่าตอบสนอง (Response) กับปัจจัย ได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกันหรือไม่ โดยได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทดลองซ้ำ (Replicate) จำนวน 10 ครั้งในแต่ละการทดลอง

3.3.4 วิธีการทดลอง

เมื่อสามารถกำหนดวิธีการทดลอง ปัจจัยตัวแปร ค่าตอบสนอง และจำนวนการทดลองซ้ำเรียบร้อยแล้ว เพื่อตั้งสมมติฐานการวิจัย ทดสอบสิ่งที่คาดการณ์ไว้ว่าเป็นจริงหรือไม่ รวมถึงสามารถสรุปผลที่ได้จากการทดสอบข้อมูลให้มีชัดเจนของข้อมูลได้มากขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้ระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชนิดของเหล็กและวัสดุสารเคลือบ หลังจากการทำงานด้วยพารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมแล้ว จำเป็นต้องทำการทดสอบยืนยันเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ โดยมีต้องทดสอบดังนี้

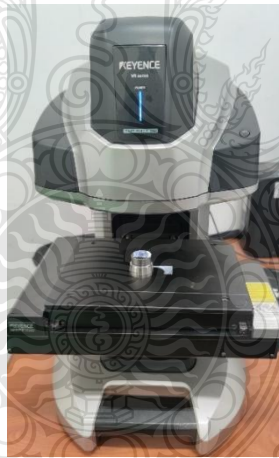
(1) การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรตามแต่ละตัว (Normality test) ด้วยวิธีสร้างแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) และการทดสอบ Kolmogorov – Smirnov test

(2) ทดสอบแยกตามผลทดสอบที่ส่งผลต่ออายุการตีตราเหรียญ ด้วยการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (significant, $P\text{-value} < 0.05$)

3.4 การทดสอบดวงตรา

3.4.1 หลังจากชุบเคลือบผิวแล้วจะทำการทดสอบการยึดเกาะ (Adhesion test) ตามมาตรฐาน VDI 3198 เพื่อทดสอบการยึดเกาะของสารเคลือบบนผิววัสดุ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงยี่ห้อ GALILEO รุ่น ERGOTEST COMP-25 โดยติดตั้งหัวเพชรปลายเป็นทรงกรวยทำมุม 120120 ± 0.35 องศา และปลายหัวกดเพชรทรงกรวย (Tip of the indenter) มีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical) มีขนาด 0.2 ± 0.015 มิลลิเมตร และใช้น้ำหนักกดที่ 150 กิโลกรัมแรง (Kilogram-force หรือ kgf) หลังจากนั้นนำส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความสามารถในการยึดเกาะซึ่งแบ่งได้เป็นระดับ HF1 - HF6

3.4.2 วัดความหยาบผิว (Roughness) ในบริเวณหน้าลวดลาย โดยใช้เครื่องมือสแกนพื้นผิวแบบ 3 มิติ ยี่ห้อ Keyence รุ่น VR-3000 รูปที่ 3.9 เพื่อวิเคราะห์ความหยาบผิวในแต่ละสารเคลือบและความหยาบผิวก่อนใช้งานและหลังใช้งาน ในตำแหน่งซ้าย และขวา ซึ่งเป็นบริเวณพื้นเรียบไม่มีลวดลาย ตำแหน่งละ 3 เส้นต่อชิ้นทดสอบ โดยเลือกใช้ Cut-off (Lc) ที่ 0.08mm และความยาวในการวัด (Evaluation length) 4 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ISO 4288



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหยาบผิว

3.4.3 เมื่อเคลือบผิวดวงตราเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะทำการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของสารที่ใช้เคลือบผิว (Scratch test) โดยเป็นวิธีที่หัวเพชร Rockwell diamond R200 ขีดลากลงบนผิวพื้นสารเคลือบยาว 10 มิลลิเมตร ด้วยความความเร็วคงที่ที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดสอบโดยเพิ่มแรงกด จาก 1 นิวตัน จนถึง 150 นิวตัน ด้วยอัตราการเพิ่มแรง 149 นิวตันต่อนาที

3.4.4 เมื่อชิ้นงานได้ทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะทำการผ่าชิ้นงานในแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางวงกลม ด้วยเครื่องตัด Wire-Cut EDM

3.4.5 ชิ้นงานที่ผ่าแล้ว จะนำไปตรวจวิเคราะห์การยึดเกาะของสารเคลือบทั้ง 3 ชนิด บนพื้นผิวชิ้นงานหลักทั้ง 3 เกรดหลัก ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้นำชิ้นงานทดสอบทำการถ่ายภาพด้วยเครื่องมืออิเล็กตรอนส่องแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเนื้อหลักทั้ง 3 ชนิด

3.4.6 ทดลองปั๊มขึ้นรูปเหรียญและบันทึกผลดีตราเหรียญ 10 บาท โดยกระบวนการดีตราเหรียญ จะใช้เหรียญตัวเปล่าโลหะสองสี ชนิดราคา 10 บาท ซึ่งไม่มีลวดลายและมีคุณลักษณะกายภาพ ตารางที่ 3.3 และเหรียญตัวเปล่าถูกยกขอบเหรียญขึ้น (Coin Rimming) รูปที่ 3.9 ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.3 หลังจากนั้นลำเลียงเหรียญตัวเปล่าเข้าสู่เครื่องดีตราเหรียญแบบอัตโนมัติยี่ห้อ GRABENER รูปที่ 3.11 โดยใช้ความเร็วดีเหรียญที่ ประมาณ 700-750 เหรียญต่อนาที และควบคุมแรงกดดีตราเหรียญที่ประมาณ 80 ตัน



รูปที่ 3.10 เหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท

3.4.7 พนักงานปฏิบัติงานหน้าเครื่องดีตราบันทึกผลอายุการใช้งานดวงตราเมื่อพบว่าคุณภาพลวดลายเกิดความเสียหายไม่สามารถดำเนินการดีตราได้ และผู้วิจัยจะเก็บรวบรวมดวงตราและเหรียญนำไปตรวจสอบคุณภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้ เช่น สารเคลือบหลุด ลวดลายเสียหาย รอยแตกร้าว เป็นต้น



รูปที่ 3.11 เหรียญตัวเปล่าถูกยกขอบเหรียญขึ้น (Coin Rimming)



รูปที่ 3.12 เครื่องตีตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน

3.5 การควบคุมคุณภาพ

3.5.1 ก่อนการตีตราเหรียญ จะมีพนักงานควบคุมคุณภาพจำนวน 1 คน ทำการตรวจสอบเหรียญก่อนเริ่มต้นตีตราเหรียญจริง โดยจะทำการตรวจสอบดังนี้

- (1) เส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาตัวเหรียญ ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิตอล
- (2) ความเอียงของลวดลายระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง ตรวจสอบโดยการให้ลวดลายด้านหน้ามีความเอียงของลวดลายที่ตรงกันกับด้านหลังตามแบบลวดลายเหรียญที่กำหนดไว้ ด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบที่ออกแบบโดยเฉพาะ
- (3) ความสมบูรณ์ของลวดลาย ตรวจสอบโดยใช้กล้องขยาย 5x เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายให้มีความถูกต้องและลวดลายชัดเจน และไม่มีลวดลายแปลกปลอมปะปน

3.5.2 ในระหว่างการปั๊มตีตราเหรียญจะทำการตรวจสอบเหรียญ โดยจะสุ่มเหรียญประมาณ 3 เหรียญ แล้วทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายโดยใช้กล้องขยาย 5x ซึ่งตรวจสอบลวดลายอย่างละเอียดถึงตำหนิต่างๆ ความเงางาม ลวดลายแปลกปลอม และดูการสึกหรอของดวงตรา เป็นต้น จนกว่าดวงตรามีการสึกหรอที่ไม่สามารถยอมรับด้านคุณภาพของเหรียญได้ แล้วจึงแจ้งให้ผู้ควบคุมเครื่องตีตราหยุดดำเนินการผลิตในดวงตราชิ้นนั้น และเปลี่ยนดวงตราชิ้นใหม่แทน พร้อมเจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพตรวจสอบซ้ำตามขั้นตอนข้อ 3.4.1

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของเหรียญตัวเปล่าโลหะสองสี ชนิดราคา 10 บาท

คุณสมบัติ	ค่าควบคุม	
เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก	25.60±0.05	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน	18.15±0.1	มิลลิเมตร
ความหนาขอบ	2.20±0.10	มิลลิเมตร
ความแข็ง	70-100	HV10

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลจากการทดลองสารเคลือบผิว PVD ด้วยสารเคลือบผิว 3 ชนิด ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ลงบนเกรตเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือขึ้นรูปเย็น X110CrMoV8-2-1 X90CrMoV7-2 และเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยกรรมวิธี ผง X140CrVW6-3-3 ใช้จำนวนตัวอย่างทดลองอย่างละ 3 ชิ้น โดยทดลองครบทุกปัจจัย รวมทั้งหมด 27 ชิ้น การทดลองนี้จะติดตามบนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท ด้านหน้าของเหรียญ และใช้ดวงตราด้านหลังของเหรียญด้วยดวงตราที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งผลที่ได้จากการติดตามจะนำวัดผลเป็นค่าต่างๆ และนำมาวิเคราะห์ความเหมาะสมสารเคลือบและเหล็กทั้ง 3 ชนิด นอกจากการทดสอบชิ้นงาน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) ถึงปัจจัยทั้ง 2 กลุ่มต่อผลการทดลอง (Response) ทั้งหมดนี้เพื่อเปรียบเทียบว่า วัสดุและสารเคลือบใดมีความเหมาะสมมากที่สุด และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแต่ละปัจจัย

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะ

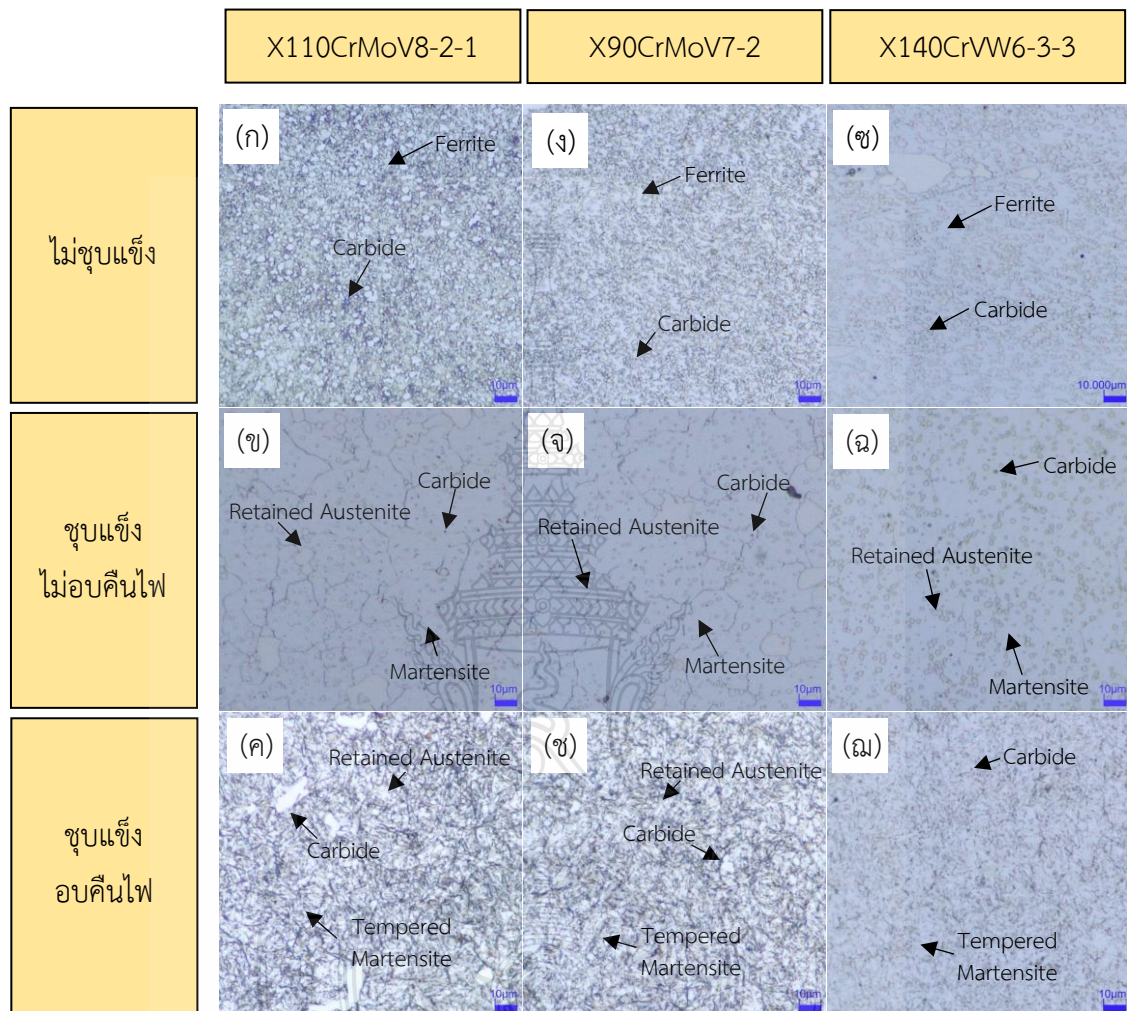
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด X110CrMoV8-2-1 ดังรูปที่ 4.1(ก) มีโครงสร้างจุลภาคก่อนชุบแข็งที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่และคาร์ไบด์ โดยผู้ผลิตได้หลอมซ้ำด้วยวิธี ESR มีบทบาทสำคัญในการลดสิ่งเจือปน เช่น ออกไซด์และซัลไฟด์ และช่วยให้การกระจายตัวของคาร์ไบด์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น หลังการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,040 °C ด้วยก๊าซไนโตรเจนโดยไม่อบคืนไฟ ดังรูปที่ 4.1(ข) โครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) โดยมีลักษณะเป็นโครงข่ายละเอียด มีคาร์ไบด์ (Carbides) ขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในเม็ดเกรน แสดงว่าไม่ได้เกิดการ Diffusion หรือ Recrystallization อย่างเต็มที่ มีออสเตนไนต์คงค้าง (Retained Austenite) และเมื่อผ่านการอบคืนไฟ สองครั้งที่ 570 °C ดังรูปที่ 4.1(ค) โครงสร้างเปลี่ยนเป็น Tempered Martensite ปรากฏเป็นโครงข่ายสีเทาเข้มหรือเป็นลายเส้นละเอียดทั่วทั้งภาพ มีคาร์ไบด์ (Carbides) รวมตัวเป็นลักษณะก้อนสีขาว มีออสเตนไนต์คงค้าง (Retained Austenite) เป็นพื้นสีขาว ทั้งนี้ เหล็ก X90CrMoV7-2 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกับเกรด X110CrMoV8-2-1 ดังรูปที่ 4.1(ง) (จ) และ (ข) แต่ไม่ผ่านวิธีการหลอมซ้ำด้วยวิธี ESR จึงส่งผลให้การกระจายของคาร์ไบด์มีความสม่ำเสมอน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.1(ง)

รวมถึงการอบคืนไฟที่อุณหภูมิสูงของเหล็ก X110CrMoV8-2-1 ดังรูปที่ 4.1(ค) ด้วยลักษณะเหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีก้อนคาร์ไบด์โตกว่าและมากกว่าเหล็ก X90CrMoV7-2 และซึ่งมีความสอดคล้อง

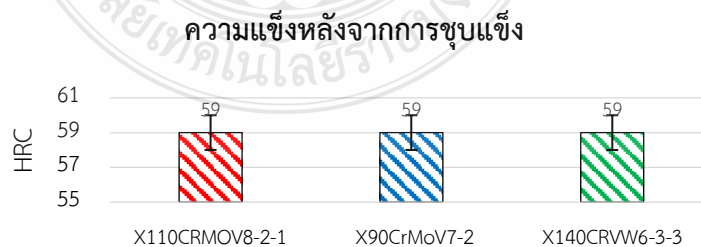
กับงานวิจัยของ Saeed Farahany [27] พบว่าการชุบที่อุณหภูมิอบคืนไฟที่ 570 °C สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าอุณหภูมิอบคืนไฟที่น้อยกว่า ดังนั้นเหล็ก X90CrMoV7-2 ซึ่งใช้อุณหภูมิอบคืนไฟที่ 530°C มีผลอายุการใช้งานที่น้อยกว่า

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด X140CrVW6-3-3 ตามรูปที่ 4.1(ซ) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าผิงโลหะ มีโครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นที่ละเอียดกว่าเมื่อเทียบกับ X90CrMoV7-2 และ X110CrMoV8-2-1 โดยแสดงเม็ดเกรนที่เล็กและการกระจายตัวของคาร์ไบด์ขนาดเล็กอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลจากการบวนการผลิตแบบ Powder Metallurgy ที่ช่วยลดการรวมกลุ่มของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่และเพิ่มความสม่ำเสมอของวัสดุ หลังการชุบแข็งที่ 1040 °C ด้วยก๊าซไนโตรเจนโดยไม่อบคืนไฟ ตามรูปที่ 4.1(ฉ) โครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย Lath Martensite ที่ละเอียดและหนาแน่นสูงมาก การอบคืนไฟเพียงครั้งเดียวที่ 550 °C ตามรูปที่ 4.1(ง) ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็น Tempered Martensite ที่ละเอียดและผลการวัดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ามีค่าความเค้นตกค้างมากกว่าเหล็กชนิดอื่นๆ ทำให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานเกิดการขยายตัวเกิดเศษฝุ่นโลหะทำให้ดวงตราสูญเสียวาง

แม้ว่าเหล็กเกรด X140CrVW6-3-3 ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการ Powder Metallurgy จะมีโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด ความแข็งสูง และความต้านทานการสึกหรอที่เหนือกว่าเหล็กเกรดอื่นอย่างชัดเจน แต่อายุการใช้งานกลับต่ำกว่าในบางสารเคลือบ ซึ่งจากระดับความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ดังตารางที่ 4.1 หลังการชุบแข็งและอบคืนไฟ เกรดเหล็ก X140CrVW6-3-3 มีความเค้นตกค้างแบบดึงสูงถึง -180 MPa ขณะที่ X110CrMoV8-2-1 อยู่ที่ -89 MPa และเหล็ก X90CrMoV7-2 ซึ่งมีคุณสมบัติทางโลหะวิทยาใกล้เคียงกับ X110CrMoV8-2-1 แต่ได้รับการพัฒนาปรับสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว มีค่าความเค้นตกค้างอยู่ที่ -123 MPa และมีอายุการใช้งานในระดับปานกลาง กล่าวคือ ต่ำกว่า X110CrMoV8-2-1 แต่ดีกว่า X140CrVW6-3-3 ในบางสารเคลือบ ซึ่งความเค้นตกค้างที่สูงเกินไปใน X140CrVW6-3-3 ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวแบบล้าและการเสียหายก่อนเวลาอันควร โดยเฉพาะในงานที่มีแรงกระแทกหรือโหลดซ้ำ มีโอกาสเกิดเศษฝุ่นโลหะในระหว่างติตราทำให้มีอาจจะเกาะยึดติดบนผิวหน้าของดวงตราเกิดร่องรอยแปลกปลอมทำให้สิ้นสุดการใช้งานได้ในขณะที่ X110CrMoV8-2-1 และ X90CrMoV7-2 มีความเสถียรเชิงกลที่ดีกว่าในสภาพใช้งานจริง เนื่องจากมีความเค้นตกค้างในระดับที่เหมาะสมกว่าและทนต่อความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตได้มากกว่า มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Denkena และคณะ (2020) [26] พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเครียดต่อมีผลต่อการลอกของสารเคลือบ และความเครียดตกค้างแบบอัด (Compressive residual stress) ช่วยเพิ่มการยึดเกาะของสารเคลือบได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.1 ภาพขยายผิวชิ้นงานแต่ละชนิดเกรดเหล็กด้วยกำลังขยาย 2,300 เท่า

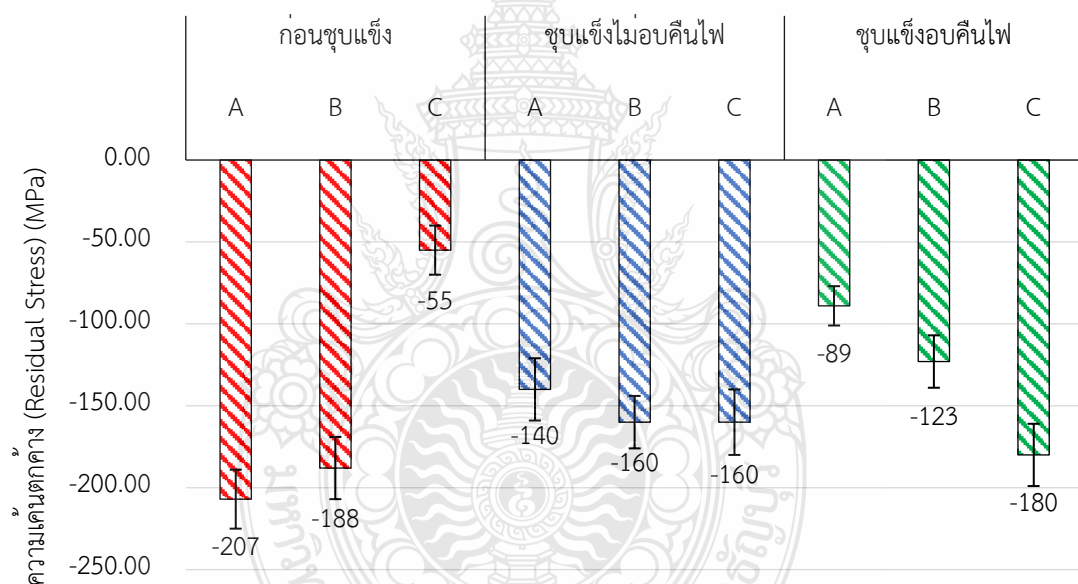


รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟ

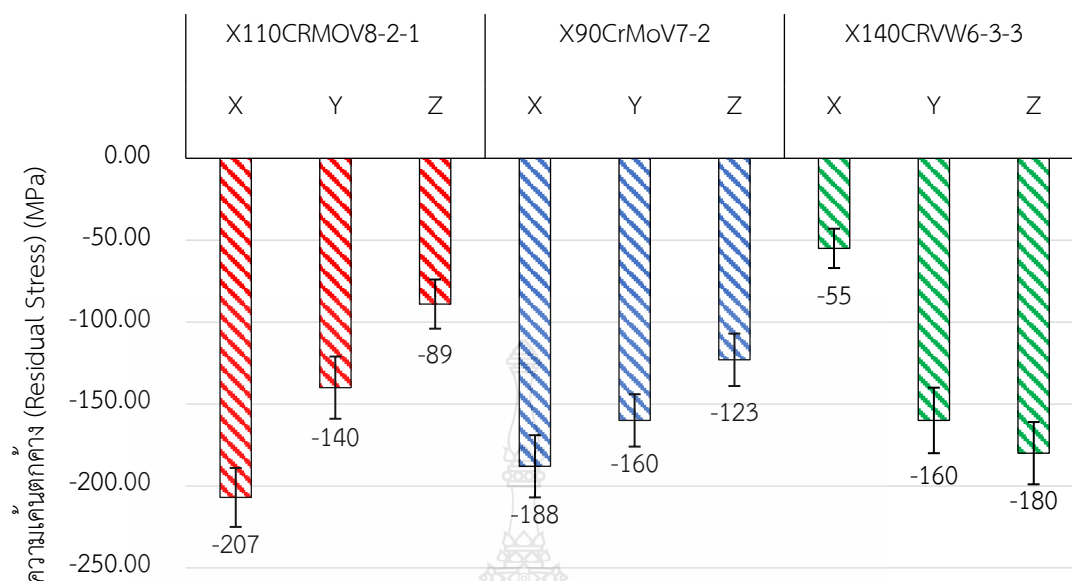
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

ชนิดเหล็ก	ก่อนชุบแข็ง	หลังชุบแข็ง ไม่อบคืนไฟ	หลังชุบแข็งและ อบคืนไฟ
X110CrMoV8-2-1	-207	-140	-89
X90CrMoV7-2	-188	-160	-123
X140CrVW6-3-3	-55	-160	-180

หน่วย MPa



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ก่อนชุบแข็ง ชุบแข็งไม่อบคืนไฟ และชุบแข็งอบคืนไฟ แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเค้นตกค้าง (Residual Stress) แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (X) ก่อนชุบแข็ง (Y) ชุบแข็งไม่อบคืนไฟ และ (Z) ชุบแข็งอบคืนไฟ

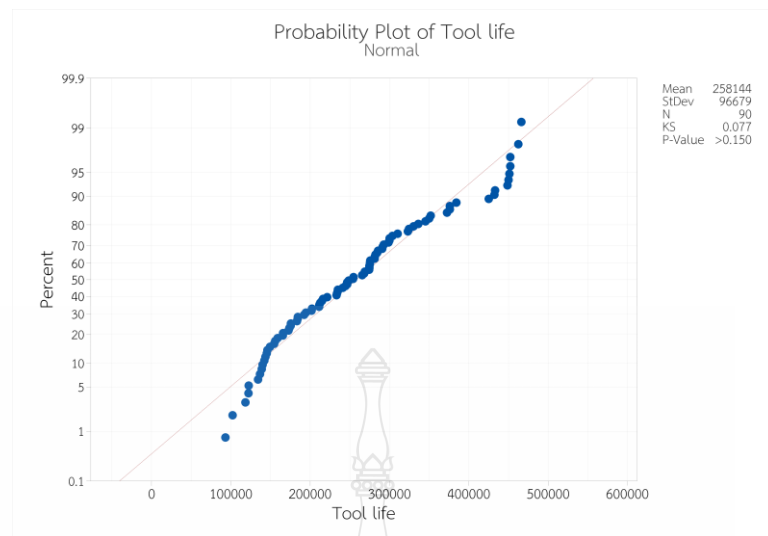
4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

4.2.1 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรตามแต่ละตัว (Normality test) ด้วยวิธี สร้างแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) และการทดสอบ Kolmogorov – Smirnov test ในโปรแกรม Minitab 22 และทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : ข้อมูลการทดสอบมีการแจกแจงแบบปกติ

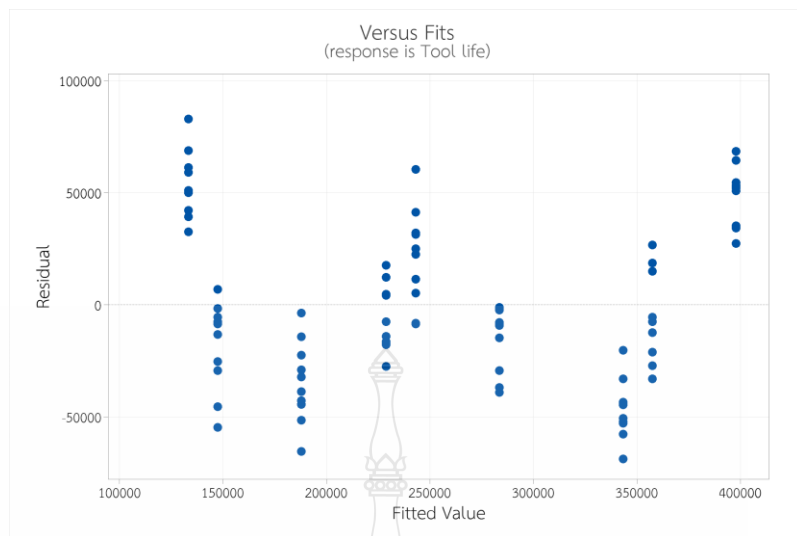
H_1 : ข้อมูลการทดสอบไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ผลการทดสอบข้อมูลเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลและเป็นค่าของกลุ่มตัวอย่างแทนข้อมูลของกลุ่มประชากร แสดงดังรูปที่ 4.5

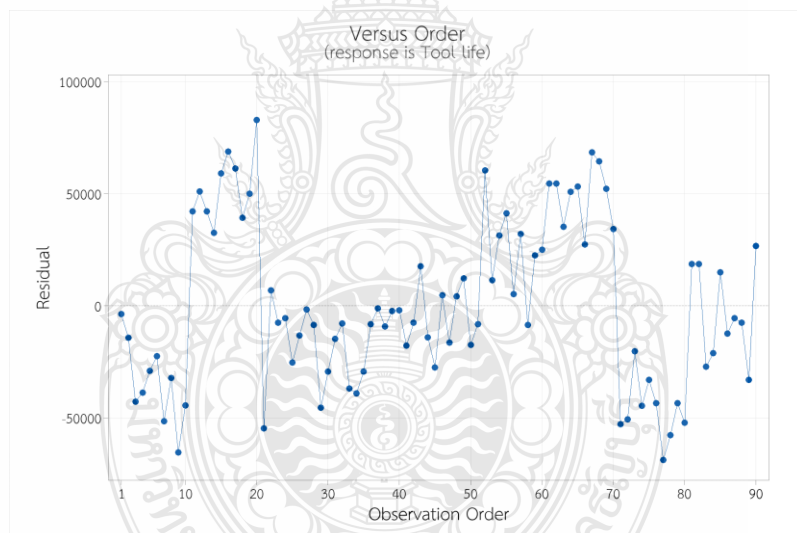


รูปที่ 4.5 กราฟการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลแต่ละปัจจัยที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าข้อมูลการทดสอบอายุการใช้งานทุกการทดสอบในทุกปัจจัยมีการแจกแจงแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ และผลการทดสอบสามารถใช้เป็นตัวแทนของประชากรได้ และจากรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงกราฟ Residual versus Fitted Value สำหรับการพยากรณ์อายุการใช้งานของเครื่องมือ พบว่าการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบค่าที่พยากรณ์ (Fitted Values) ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลที่ใช้มีความเหมาะสมในการพยากรณ์ เนื่องจากไม่มีสัญญาณของความแปรปรวนที่ไม่คงที่หรือความลำเอียงในโมเดล และรูปที่ 4.7 แสดงกราฟ Residual เทียบกับลำดับการสังเกต (Observation Order) สำหรับการตอบสนองที่เป็นอายุการใช้งานของดวงตรา โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระบบและไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนตลอดช่วงของลำดับการสังเกต ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลไม่มีปัญหาเรื่องความสัมพันธ์ตามลำดับเวลา (Autocorrelation) และสามารถพยากรณ์ข้อมูลได้อย่างแม่นยำในแต่ละช่วงของการทดลอง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการประกอบกับอายุการใช้งาน



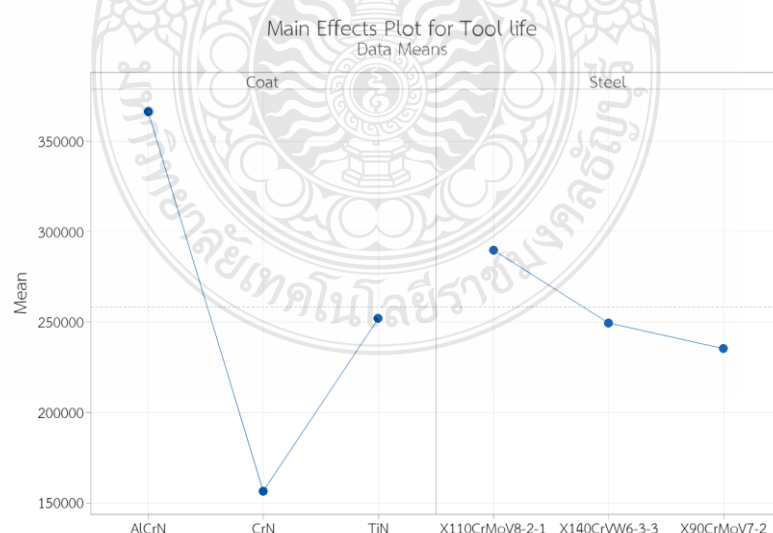
รูปที่ 4.7 ค่าคงเหลือของอายุการใช้งานเครื่องมือเทียบกับลำดับการสังเกต

4.2.2 ผลการทดสอบ ANOVA พิสูจน์ความแตกต่างของปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา

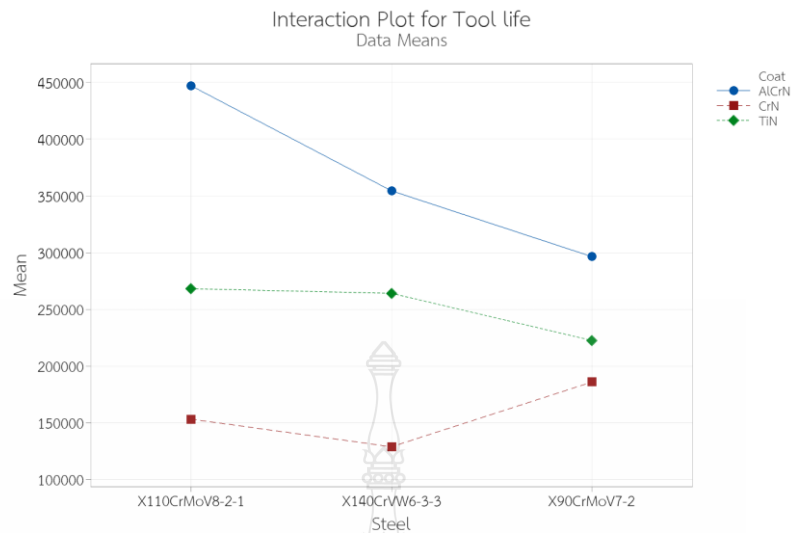
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Coat	2	6.63E+11	3.32E+11	1116.78	0
Steel	2	4.81E+10	2.4E+10	80.99	0
Coat*Steel	4	9.67E+10	2.42E+10	81.4	0
Error	81	2.4E+10	2.97E+08		
Total	89	8.32E+11			

จากตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าทั้งปัจจัยหลัก Coat และ Steel และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Coat*Steel) มีผลต่ออายุการใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ว่าผลของการเคลือบผิวขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก Main Effect Plot และรูปที่ 4.8 Interaction Effect Plot แสดงให้เห็นว่า AlCrN และ X110CrMoV8-2-1 เป็นตัวเลือกที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในด้านอายุการใช้งาน ขณะที่ CrN และ X90CrMoV7-2 มีแนวโน้มอายุการใช้งานลดลงมากที่สุด ซึ่งมีผลสอดคล้องกับอายุการใช้งานทุกเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 4.8 กราฟ Interaction Effect Plot ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดวงตรา



รูปที่ 4.9 กราฟ Interaction Effect Plot ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่ออายุการใช้งานดงตรา

4.2.3 ทดสอบแยกตาม 3 ตัวแปร ได้แก่ ความหยาบผิว (Roughness) ความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) และความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) ที่ส่งต่อตัวแปรตามเป็นผลต่ออายุการตีตราเหรียญด้วยการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA โดยจะตั้งสมมติฐาน ดังนี้

ก) เป้าหมาย 1 : ปัจจัย Coat และ Steel มีผลต่อความหยาบผิว (Roughness) หรือไม่

$H_{0_{Ra1}}$: Coat และ Steel ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว

$H_{1_{Ra1}}$: Coat และ Steel มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัย Coat และ Steel มีผลต่อความหยาบผิว (Roughness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Coat	2	0.01084	0.005419	7.97	0.001
Steel	2	0.11334	0.056671	83.36	0
Coat*Steel	4	0.08154	0.020384	29.98	0
Error	81	0.05507	0.00068		
Total	89	0.26078			

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงว่า Coat และ Steel มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบ (Ra) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-Value} < 0.05$) และยังพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Coat และ Steel อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าผลการศึกษานี้

ชี้ให้เห็นว่าการเลือกวัสดุที่เหมาะสมระหว่างสารเคลือบและเหล็กกล้าเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมค่าความหยาบของดวงตรา

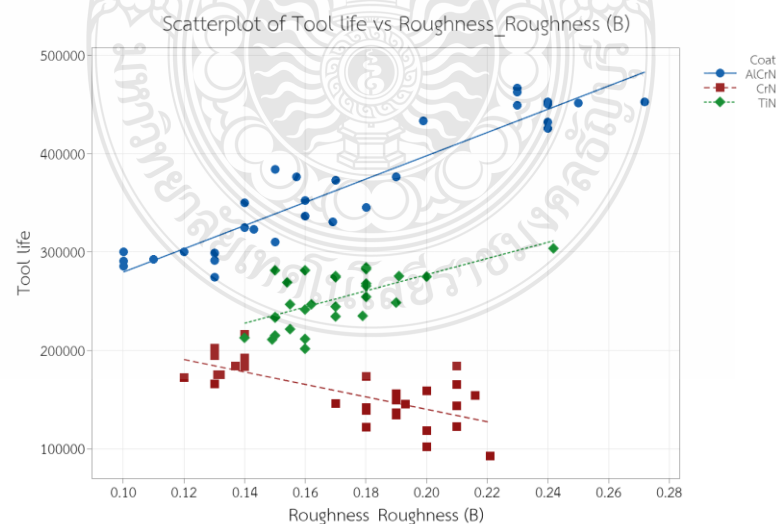
ข) เป้าหมาย 2 : ความหยาบผิวมีผลต่ออายุการใช้งานดวงตราหรือไม่

H_{0Ra2} : ความหยาบผิวไม่มีผลต่ออายุการใช้งานดีตรา

H_{1Ra2} : ความหยาบผิวมีผลต่ออายุการใช้งานดีตรา

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความหยาบผิวมีผลต่ออายุการใช้งานดวงตรา

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Roughness_Roughness (B)	1	157940432	157940432	0.46	0.499
Roughness_Roughness (A)	1	10896407	10896407	0.03	0.859
Coat	2	3169736134	1584868067	4.64	0.013
Steel	2	1017287141	508643571	1.49	0.232
Roughness_Roughness (B)*Coat	2	38764109519	19382054759	56.73	0.000
Roughness_Roughness (B)*Steel	2	478084176	239042088	0.70	0.500
Roughness_Roughness (A)*Coat	2	654903609	327451804	0.96	0.388
Roughness_Roughness (A)*Steel	2	1029530899	514765449	1.51	0.228
Error	75	25625412364	341672165		
Total	89	8.31867E+11			



รูปที่ 4.10 กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว

จากตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (ANOVA) ผลการวิเคราะห์พบว่า ชนิดของสารเคลือบมีผลหลักอย่างมีนัยสำคัญต่ออายุการใช้งานเครื่องมือ ($P=0.013$) ในขณะที่ชนิดของ เหล็กกล้า ($P=0.232$) และความหยาบผิวทั้งสอง (Roughness Before: $P=0.499$, Roughness After: $P=0.859$) ไม่มีผลต่ออายุการใช้งานที่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่าง ความหยาบผิวเริ่มต้นกับชนิดสารเคลือบ ($P=0.000$) บ่งชี้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเริ่มต้นกับ อายุการใช้งานเครื่องมือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบที่ใช้ ดังแสดงใน Scatter plot รูปที่ 4.10 ด้วยผลปฏิสัมพันธ์นี้ ทำให้ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักความหยาบผิวไม่มีผล ต่ออายุการใช้งานได้ โดยผลของความหยาบผิวไม่ได้เป็นผลหลักที่คงที่ แต่เป็นผลที่ขึ้นอยู่กับชนิดของ สารเคลือบ ทั้งนี้ ปฏิสัมพันธ์อื่นๆ ระหว่างความหยาบผิวกับปัจจัยต่างๆ ไม่พบว่ามีนัยสำคัญ ($P > 0.05$ ทุก รายการ)

ค) เป้าหมาย 3: ดูว่า Coat และ Steel มีผลต่อความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) หรือไม่

H_{0St1} : Coat และ Steel ไม่มีผลต่อการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test)

H_{1St1} : Coat และ Steel มีผลต่อการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยหลัก Coat และ Steel ต่อความสามารถในการเกาะยึดของ ผิวเคลือบ (Scratch Test)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Coat	2	4253.6	2126.82	253.52	0.000
Steel	2	231.9	115.94	13.82	0.000
Coat*Steel	4	1105.5	276.37	32.94	0.000
Error	18	151	8.39		
Total	26	5742			

จากตารางที่ 4.5 เนื่องจากค่า P-value สำหรับทั้งปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมนั้นต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_{0St1}) สรุปได้ว่าทั้งชนิดของสารเคลือบและชนิดของเหล็ก มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบในการทดสอบ Scratch Test

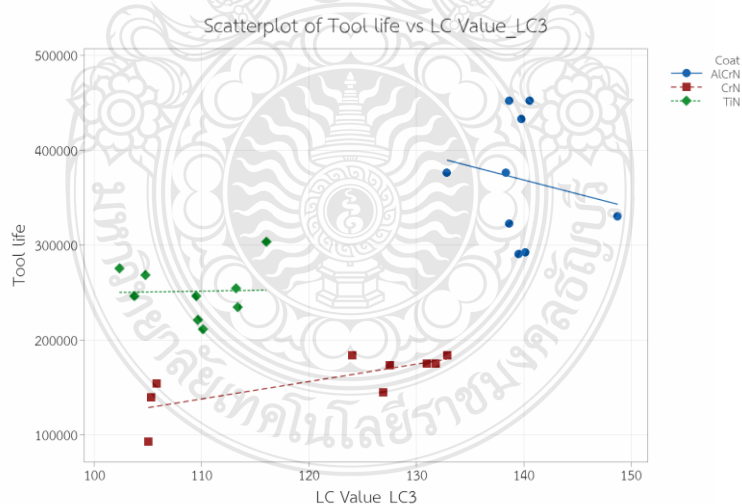
ง) เป้าหมาย 4: ดูว่าความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) มีผลต่อมีผลต่อ Tool Life หรือไม่

H_{0St2} : การเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) ไม่มีผลต่ออายุการใช้งานตีตรา

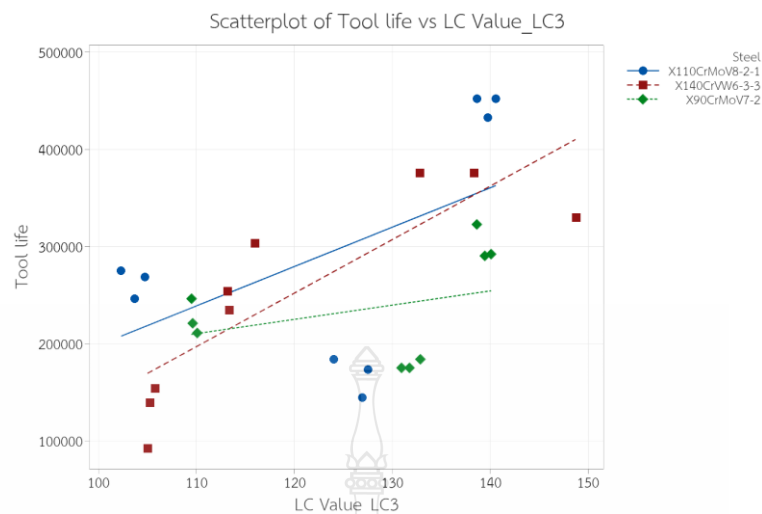
H_{1St2} : การเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) มีผลต่ออายุการใช้งานตีตรา

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ (Scratch Test) ต่ออายุการใช้งาน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
LC Value_LC3	1	854037612	854037612	0.92	0.351
Coat	2	8825284878	4412642439	4.76	0.023
Steel	2	5753045963	2876522982	3.10	0.071
LC Value_LC3*Coat	2	6721164870	3360582435	3.62	0.049
LC Value_LC3*Steel	2	7129570444	3564785222	3.84	0.042
Error	17	15767998426	927529319		
Total	26	2.48818E+11			



รูปที่ 4.11 กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว แยกตามชนิดสารเคลือบ



รูปที่ 4.12 กราฟกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความหยาบผิว แยกตามชนิดเหล็ก

จากตารางที่ 4.6 ชนิดของสารเคลือบ (Coat) มีผลหลักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่ออายุการใช้งานเครื่องมือ ($P=0.023$) ในขณะที่ LC3 เพียงอย่างเดียว ($P=0.351$) และชนิดของเหล็กกล้า (Steel) เพียงอย่างเดียว ($P=0.071$) ไม่แสดงผลหลักที่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม พบว่ามี ปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่าง LC3 กับชนิดสารเคลือบ ($P=0.049$) และปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่าง LC3 กับชนิดเหล็กกล้า ($P=0.042$) ผลปฏิสัมพันธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LC3 กับอายุการใช้งานดวงตราแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญไปตามชนิดของสารเคลือบและชนิดของเหล็กที่ใช้ งาน ดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จาก Scatter Plots โดยความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง LC3 กับ Tool Life จะแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มของ Coat และ Steel

จ) เป้าหมาย 5: ว่า Coat และ Steel มีผลต่อความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) หรือไม่

H_{0H1} : Coat และ Steel ไม่มีผลต่อความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness)

H_{1H1} : Coat และ Steel มีผลต่อความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness)

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัย Coat และ Steel ต่อความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Coat	2	29508474	14754237	12444.67	0
Steel	2	370957	185479	156.44	0
Coat*Steel	4	672688	168172	141.85	0
Error	81	96033	1186		
Total	89	30648152			

จากตารางที่ 4.7 ทั้งประเภทของ Coat และ Steel มีผลต่อความแข็งของผิวเคลือบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-Value} < 0.05$) และยังพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Coat และ Steel อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า ผลของการเลือกใช้สารเคลือบต่อค่าความแข็งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กที่ใช้ร่วมด้วย ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกคู่วัสดุที่เหมาะสมระหว่างสารเคลือบและเหล็กกล้าเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมค่าความแข็งของผิวเคลือบ

ฉ) เป้าหมาย 6: ปัจจัยความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) มีผลต่อ Tool Life หรือไม่

H_{0Hn2} : ความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ ไม่มีผลต่ออายุการใช้งานตีตรา

H_{1Hn2} : ความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ มีผลต่ออายุการใช้งานตีตรา

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ ANOVA ปัจจัยความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) ต่ออายุการใช้งาน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hardness	1	1.54E+10	1.54E+10	41.95	0
Coat	2	2.31E+10	1.15E+10	31.37	0
Steel	2	4.98E+10	2.49E+10	67.69	0
Hardness*Coat	2	2.87E+10	1.44E+10	39.03	0
Hardness*Steel	2	8.07E+10	4.04E+10	109.73	0
Error	80	2.94E+10	3.68E+08		
Total	89	8.32E+11			

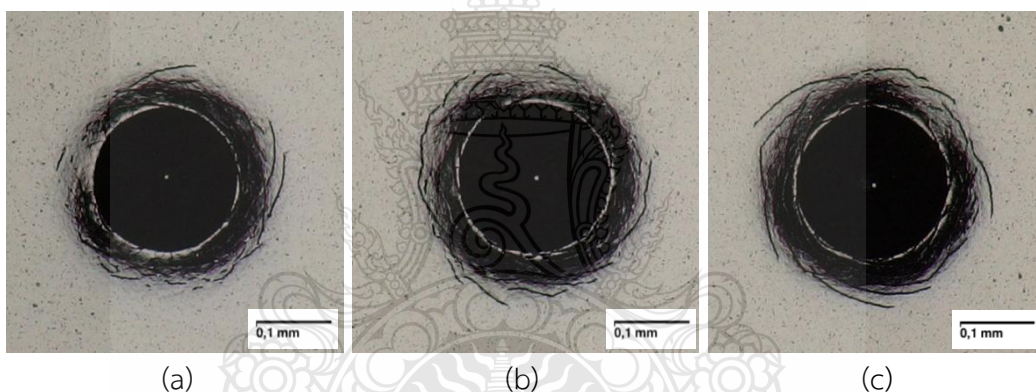
จากตารางที่ 4.8 ความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่ออายุการใช้งานตีตรา ($P\text{-value} = 0.000$) ทำให้เราสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_{0Hn2}) และยอมรับสมมติฐานทางเลือก (H_{1Hn2}) ความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานได้ และพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติอย่างมากระหว่างความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบกับชนิดของสารเคลือบ (Hardness*Coat , $P=0.000$) และระหว่างความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบกับชนิดของเหล็ก (Hardness*Steel , $P=0.000$) ซึ่งหมายความว่า ผลของความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบต่ออายุการใช้งานตีสานั้นจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับว่าใช้สารเคลือบชนิดใดและเหล็กชนิดใด นอกจากนี้ ชนิดของสารเคลือบและชนิดของเหล็กเองก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออายุการใช้งานตีตราเช่นกัน ($\text{Coat } P=0.000$, $\text{Steel } P=0.000$)

4.3 ผลการทดสอบดวงตรา

4.3.1 การทดสอบ Adhesion test การยึดเกาะของสารเคลือบ ตามมาตรฐาน VDI 3198

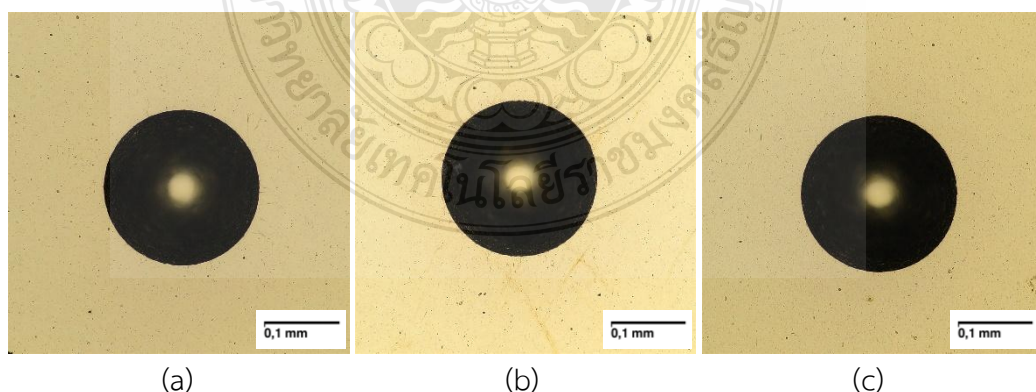
ผลจากการทดลองการยึดเกาะของสารเคลือบ ด้วยวิธี VDI 3198 (Rockwell C Indentation) เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบและทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการยึดเกาะ HF1-HF6

เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าบริเวณรอบกดของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนเหล็กทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะรอยแตกแยกของชั้นผิวเคลือบรอบๆ จุดกดทดสอบ แต่ไม่ปรากฏรอยแตกก่อนของสารเคลือบตาม ดังรูปที่ 4.13 และสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (CrN) ดังรูปที่ 4.14 และอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) ดังรูปที่ 4.15 บนเหล็กทั้ง 3 ชนิด ไม่พบรอยแตกแยกหรือความเสียหาย และผิวเคลือบจัดอยู่ในระดับ HF1 ทั้ง 3 ชนิดสารเคลือบ เป็นผลที่แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบได้มีการยึดเกาะกับเนื้อวัสดุที่ดีมาก



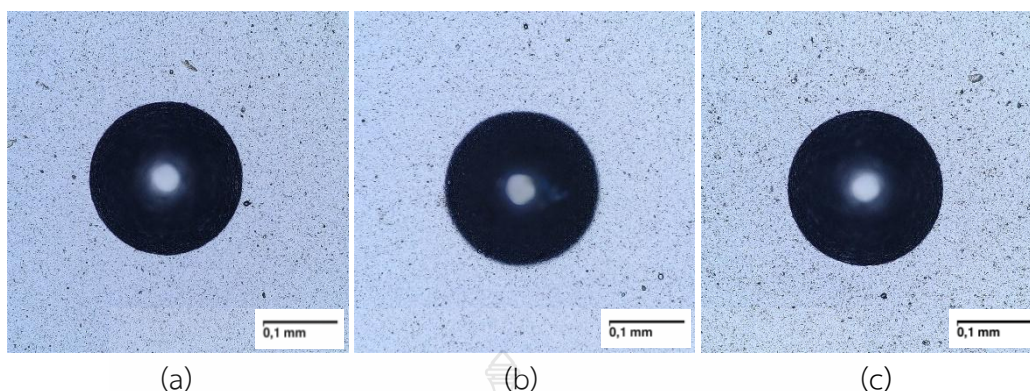
รูปที่ 4.13 แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนวัสดุเหล็ก (a)

X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.14 แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) บนวัสดุเหล็ก

(a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.15 แสดงการ Adhesion test ของสารเคลือบอะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) บนวัสดุ เหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า

4.3.2 การวัดความหยาบผิว (Roughness)

เพื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวของดวงตราก่อนใช้งานและหลังใช้งาน ซึ่งความหยาบผิวเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้พื้นผิวของลวดลายดวงตรามีความเงามากหรือน้อย โดยหลักความเงาของดวงตราจะถูกกำหนดด้วยมาตรฐานของโรงกษาปณ์ที่ไม่เงามากจนเกินไปและไม่เงาด้านจนเกินไป

จากการทดลองวัดค่าความหยาบผิว ตามตารางที่ 4.9 พบว่าเหล็ก X110CrMoV8-2-1 ก่อนตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.198, 0.133 และ 0.192 ไมโครเมตร ตามลำดับ เหล็ก X90CrMoV7-2 ก่อนตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.169, 0.153 และ 0.187 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเหล็ก X140CrVW6-3-3 ก่อนตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.237, 0.121 และ 0.162 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเมื่อนำดวงตราทั้งหมดไปทดลองตีตราจนหมดอายุการใช้งาน พบว่าเหล็ก X110CrMoV8-2-1 หลังตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.191, 0.176 และ 0.185 ไมโครเมตร ตามลำดับ เหล็ก X90CrMoV7-2 หลังตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.176, 0.181 และ 0.193 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเหล็ก X140CrVW6-3-3 หลังตีตรา มีความหยาบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบผิว CrN, TiN และ AlCrN ที่ 0.218, 0.263 และ 0.139 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหยาบผิวทั้งหมดแล้วพบว่าเหล็ก X140CrVW6-3-3 ของสารเคลือบผิว TiN มีค่าความหยาบมากขึ้นถึง 0.142 ไมโครเมตร และเหล็ก X140CrVW6-3-3 ของสารเคลือบผิว AlCrN มีค่าความหยาบลดลงถึง 0.023 ไมโครเมตร

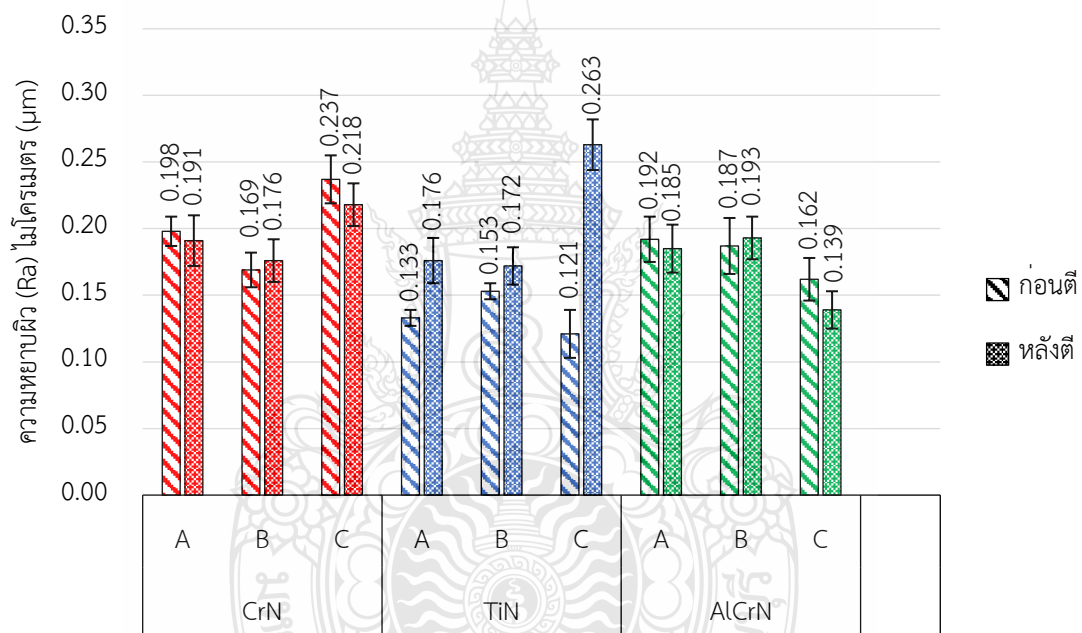
ตารางที่ 4.9 ค่าความหยาบก่อนตีตราและหลังตีตรา

หน่วย : ไมโครเมตร

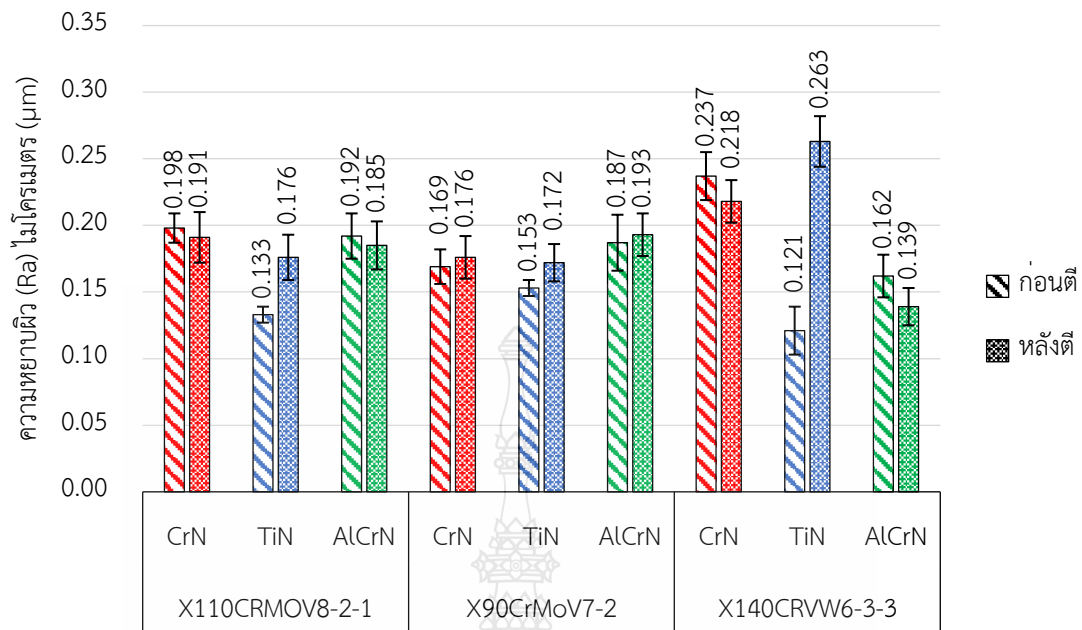
สารเคลือบ	วัสดุเหล็ก	ก่อนตี	หลังตี	เปลี่ยนแปลง
CrN	X110CrMoV8-2-1	0.198	0.191	-0.007
	X90CrMoV7-2	0.169	0.176	0.007
	X140CrVW6-3-3	0.237	0.218	-0.019
TiN	X110CrMoV8-2-1	0.133	0.176	0.043
	X90CrMoV7-2	0.153	0.181	0.028
	X140CrVW6-3-3	0.121	0.263	0.142
AlCrN	X110CrMoV8-2-1	0.192	0.185	0.007
	X90CrMoV7-2	0.187	0.193	0.006
	X140CrVW6-3-3	0.162	0.139	-0.023

โครงสร้างและการสะสมของฟิล์มเคลือบแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 โดย X140CrVW6-3-3 สารเคลือบ TiN มีลักษณะการสะสมที่สร้างความขรุขระบนพื้นผิวสูงสุด แต่มีอายุการใช้งานอยู่ในระดับกลาง เป็นผลจากความเงาโดยรวมที่ไม่เกินเกณฑ์ควบคุมที่กำหนด และอาจจะมีการสึกหรออื่นที่สอดคล้องกับ Panjan et al. [28] โดยอัตราการสึกหรอของสารเคลือบจะเพิ่มขึ้นตามความหยาบผิวสารเคลือบที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าความหยาบผิวลดลงในสารเคลือบ CrN บนเหล็กเกรด X110CrMoV8-2-1 และ X140CrVW6-3-3 และสารเคลือบ AlCrN บนเกรดเหล็ก X140CrVW6-3-3 หลังจากการตีตราเสร็จสิ้นอายุของดวงตรา อาจเป็นผลจาก Self-Polishing Effect เป็นกลไกที่ช่วยลดความหยาบผิวของ PVD coatings หลังจากการใช้งาน โดยมีปัจจัยสำคัญ เช่น แรงกดสูง (High Contact Pressure) ที่ช่วยขจัดความขรุขระของพื้นผิว โดยการเสียดสีของเศษโลหะขนาดเล็ก (Abrasive Wear) ที่ทำหน้าที่เป็นสารขัดถู และโครงสร้างนาโนของสารเคลือบ (Nanostructured Grains) ที่ช่วยให้พื้นผิวเรียบขึ้นโดยธรรมชาติ สอดคล้องกับ Polok-Rubiniec et al., Kara & Öztürk, และ Saketi et al. [29-31] รายงานว่าฟิล์มเคลือบ PVD บางชนิดสามารถเกิดกลไก Self-Polishing Effect ผ่านกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์หรือการปรับสภาพผิวอัตโนมัติระหว่างการทำงาน ส่งผลให้สมบัติการหล่อลื่นและความทนทานของผิวเคลือบดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เหล็ก X90CrMoV7-2 สารเคลือบ CrN เหล็ก X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 สารเคลือบ TiN และเหล็ก X110CrMoV8-2-1 และ X90CrMoV7-2 สารเคลือบ AlCrN มีค่า Ra เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการแตกของ Micro-Droplets หรือการฝังตัวของเศษโลหะที่ทำให้

พื้นผิวหยาบขึ้นแทน สอดคล้องกับ Heinrichs et al., Panjan et al., Carlsson และ Olsson [32-34] ที่ชี้ว่าความขรุขระในระดับเหมาะสม สามารถลดการยึดติดและเพิ่มความทนทานต่อแรงเสียดทาน และในงานวิจัยของ Heinrichs et al. [32] ที่พบว่าอนุภาคโลหะขนาดเล็กสามารถช่วยลดความหยาบของพื้นผิวได้ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยภายนอก เช่น Micro-Droplets อาจทำให้ความหยาบผิวสูงขึ้น สอดคล้องกับ Endrino et al. และ Sousa et al. [35, 36] แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเคลือบอนุภาคแข็งที่ฝังตัวลงบนพื้นผิว หรือการแตกร้าวของชั้นเคลือบที่ไม่เสถียร อาจทำให้ความหยาบผิวเพิ่มขึ้นแทน ดังนั้น การเลือกวัสดุเคลือบที่เหมาะสมและการควบคุมสภาวะการใช้งานที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ Self-Polishing Effect และยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความหยาบผิวก่อนตีตราและหลังตีตรา แบ่งตามชนิดสารเคลือบ
(A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความหยาบผิวก่อนตีตราและหลังตีตรา แบ่งตามชนิดโลหะ

แม้ว่าพารามิเตอร์ Ra จะเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้ในการประเมินความขรุขระของพื้นผิวในเชิงเส้น แต่การเพิ่มการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ Sa และ Ssk จะช่วยให้การประเมินลักษณะพื้นผิวมีความละเอียดและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในบริบทของการควบคุมการสึกหรอและประสิทธิภาพการสัมผัสของชิ้นส่วนกลไก พารามิเตอร์ Sa ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยความสูงในเชิงพื้นที่ (3D) สามารถสะท้อนลักษณะความหยาบของพื้นผิวได้ดีกว่า Ra ในขณะที่ Ssk เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการกระจายของยอดและหลุมบนพื้นผิว โดยพื้นผิวที่มีค่า Ssk < 0 มักแสดงถึงลักษณะยอดมนและหลุมลึก ซึ่งช่วยลดการสึกหรอจากการขังน้ำมันลงบนหลุมบนผิวพื้น ถึงแม้ Sa จะไม่อยู่ในระดับต่ำมาก ดังนั้นการใช้พารามิเตอร์ทั้งสามร่วมกับ Ra จะช่วยเสริมความแม่นยำในการวิเคราะห์และออกแบบพื้นผิวให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งมีความขัดแย้งบางส่วนกับงานวิจัยของ Yang [37] ที่ว่า Ssk มีอิทธิพลต่อการกระจายความสูงของพื้นผิว และสามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุมการสึกหรอ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่สามารถลด Sa ได้มาก และการใช้พารามิเตอร์ Sa ร่วมกับ Ssk จะช่วยให้การวิเคราะห์พื้นผิวมีความแม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในงานที่ต้องการควบคุมการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนกลไก แต่ในกระบวนการตีตราเหรียญที่เน้นความสะอาดและไม่มีการใช้สารหล่อลื่น เช่น น้ำมัน เป็นต้น ดังนั้น การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยพารามิเตอร์ Ra, Sa และ Ssk มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และคุณภาพของชิ้นงาน โดยทั่วไป

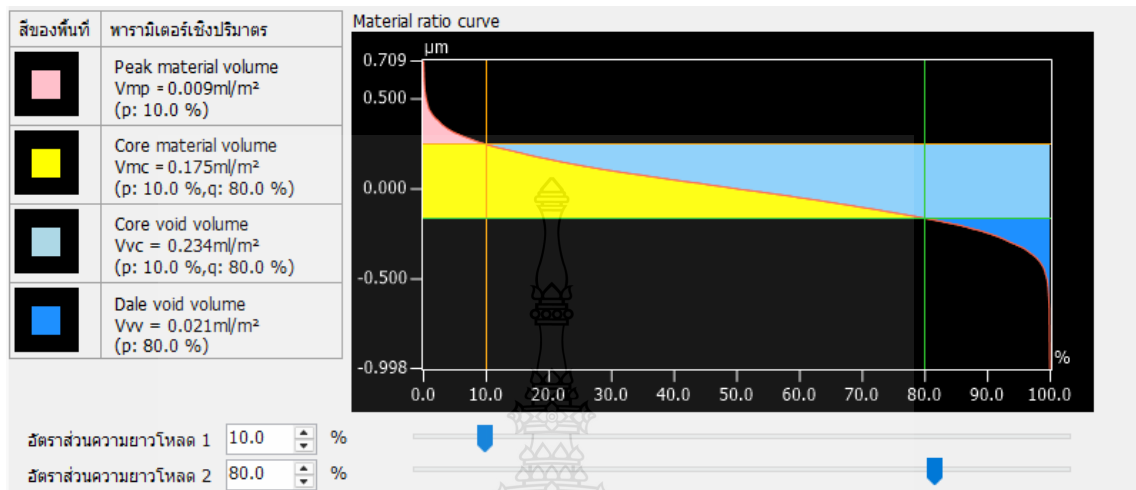
พื้นผิวที่มีค่า $S_{sk} < 0$ เหมาะสมต่อการกักเก็บน้ำมันและลดการสึกหรอ แต่ด้วยผลอายุการใช้งานพบว่า ดวงตราที่มีอายุการใช้งานมากที่สุดเป็นชนิดเหล็ก X110CrMoV8-2-1 ด้วยสารเคลือบ AlCrN จากตารางที่ 4.10 พบว่ามีค่าเฉลี่ย S_{sk} มากกว่า 0 และดวงตราที่มีอายุการใช้งานน้อยที่สุดเป็นชนิดเหล็ก X140CrVW6-3-3 ด้วยสารเคลือบ CrN พบว่ามีค่าเฉลี่ย S_{sk} น้อยกว่า 0 ซึ่งแสดงถึงลักษณะยอดแหลมมากกว่าหลุมลึก กลับให้ผลลัพธ์อายุการใช้งานที่ดีกว่าในสภาวะที่ไม่มีการหล่อลื่น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ยอดแหลมช่วยลดพื้นที่สัมผัสจริงระหว่างผิวแม่พิมพ์กับวัสดุ ส่งผลให้แรงเสียดทานและการสึกหรอลดลง อีกทั้ง ยังเอื้อต่อการปลดชิ้นงานออกจากดวงตราได้ง่ายขึ้นในกระบวนการที่ต้องการความสะอาดสูง ดังนั้น การเลือกใช้พารามิเตอร์พื้นผิว จึงควรพิจารณาให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริง โดยเฉพาะในงานที่ไม่มีการหล่อลื่นและต้องการความสวยงามและไม่ส่งผลเสียต่อลวดลายหรือพื้นผิว

ตารางที่ 4.10 ค่าความหยาบพื้นผิว S_a และ S_{sk} ระหว่าง K340 ด้วยสารเคลือบ AlCrN และ K490 ด้วยสารเคลือบ CrN (หน่วยไมโครเมตร)

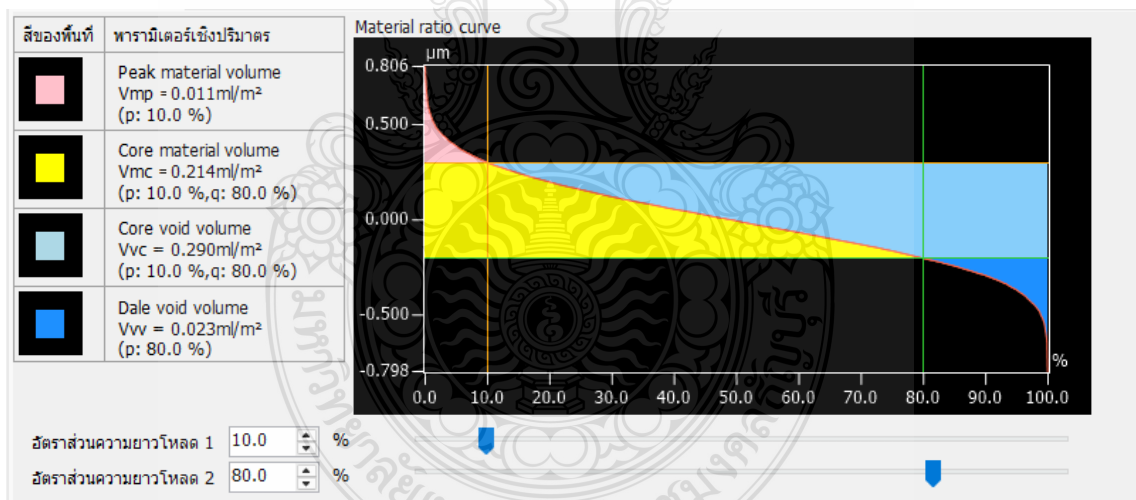
ความหยาบ พื้นผิว	X110CrMoV8-2-1 สารเคลือบ AlCrN	X140CrVW6-3-3 สารเคลือบ CrN
S_a สูงสุด	0.203	0.176
S_a ต่ำสุด	0.121	0.142
S_a เฉลี่ย	0.137	0.157
S_{sk} สูงสุด	1.232	0.336
S_{sk} ต่ำสุด	-0.256	-0.332
S_{sk} เฉลี่ย	0.058	-0.039

เมื่อดวงตราหมดอายุการใช้งาน จึงได้ตรวจวัดหา Material Ratio Curve ของดวงตราที่มีอายุการใช้งานมากที่สุดและอายุการใช้งานน้อยที่สุด จากรูป 4.18 และ 4.19 เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพพื้นผิวของดวงตราหลังจากใช้งาน พบว่ารูปที่ 4.18 ชนิดเหล็ก X110CrMoV8-2-1 ด้วยสารเคลือบ AlCrN มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ โดยมีค่าปริมาตรยอดผิว (V_{mp}) และร่องลึก (V_{vv}) มีค่าต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับการผลิตเหรียญที่ต้องการความคมชัดสูงและลดการสึกหรอของดวงตรา และในรูปที่ 4.19 ชนิดเหล็ก X140CrVW6-3-3 ด้วยสารเคลือบ CrN แสดงพื้นผิวที่หยาบ

และมีร่องลึกมากขึ้น โดยค่าปริมาตรวัสดุและช่องว่างในแกนกลาง (V_{mc}) และ V_{vc}) สูงกว่า ซึ่งอาจส่งผลให้ดวงตรามีอายุการใช้งานสั้นลง จึงมีความสอดคล้องด้านคุณภาพพื้นผิวต่ออายุการใช้งาน



รูปที่ 4.18 แสดง Material ratio curve ของชนิดเหล็ก X110CrMoV8-2-1 บนสารเคลือบ AlCrN



รูปที่ 4.19 แสดง Material ratio curve ของชนิดเหล็ก X140CrVW6-3-3 บนสารเคลือบ CrN

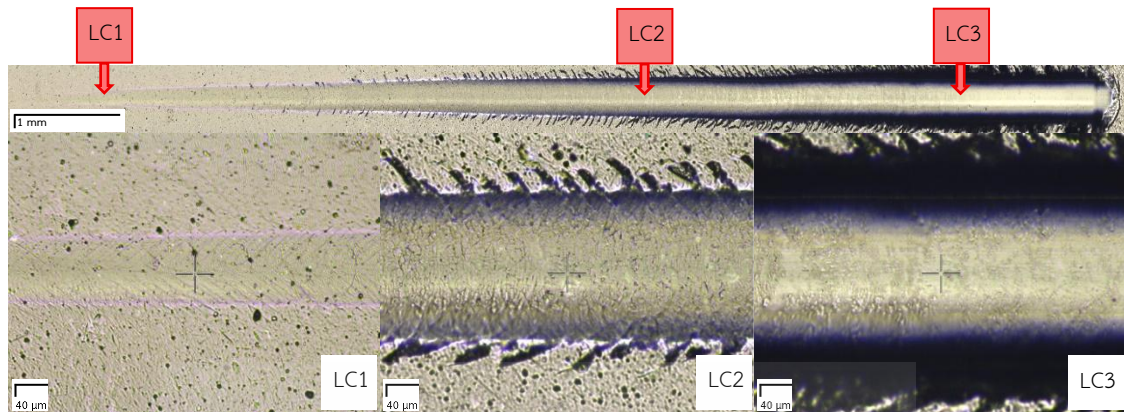
4.3.3 ทดสอบความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบด้วยวิธี Scratch Test

การทดสอบรอยขีดข่วน (Scratch Test) ถือเป็นเทคนิคมาตรฐานในการประเมินสมบัติทางกลและความต้านทานของชั้นเคลือบ (Coating) โดยทั่วไปจะมีการตรวจวัดความเสียหายสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือการตรวจสอบรอยแตกร้าว (Crack) และการแยกตัวของชั้น

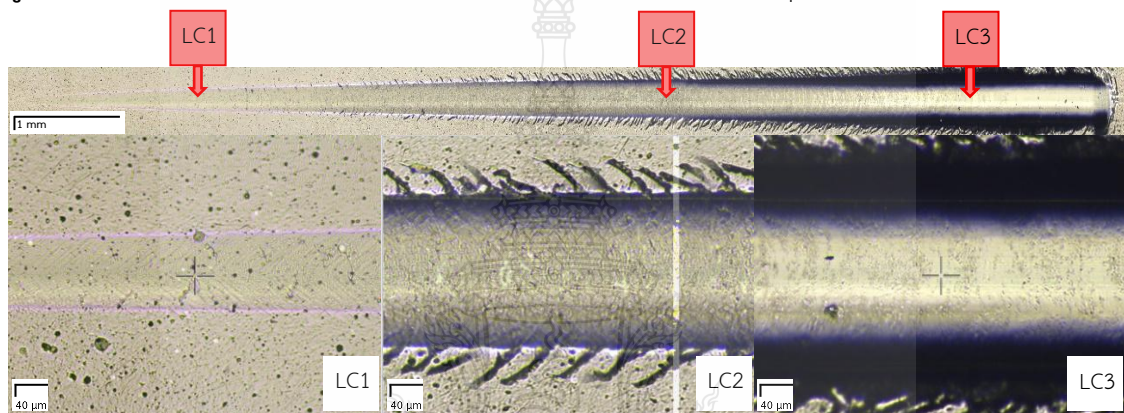
(Delamination) ด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการขีดข่วน เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหรือความเสียหายทางกายภาพบนพื้นผิวหรือชั้นเคลือบ ส่วนที่สองเป็นการวัดสัญญาณแรงสัมผัส (Ft) และคลื่นเสียง (Acoustic Emission, AE) แบบเรียลไทม์ ซึ่งสะท้อนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขีดข่วน เช่น การเริ่มแตกร้าวหรือกระบวนการหลุดลอกของชั้นเคลือบ แม้จะมีการใช้งานแพร่หลาย แต่ก็ยังคงมีข้อถกเถียงในนิยามและขอบเขตของ “การแตกร้าว” และ “การแยกตัวของชั้น” เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ รวมถึงการตีความความเปลี่ยนแปลงของกราฟ Ft และ AE ที่อาจไม่สอดคล้องกับสถานะความเสียหายจริง เนื่องจากการเกิดรอยแตกร้าวหรือหลุดลอกมักมีหลายขั้นตอนและอาจเชื่อมโยงกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพผิว ร่องพื้น และกระบวนการเคลือบ ดังนั้น การเชื่อมโยงข้อมูลเชิงสัญญาณกับความเสียหายจริงจึงต้องอาศัยเทคนิคเพิ่มเติมร่วมกับความชำนาญในการวิเคราะห์ ซึ่งยังคงเป็นประเด็นที่นักวิจัยให้ความสำคัญในการพัฒนาวิธีวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ผลทดสอบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

ผลการทดสอบ Scratch Test ด้วยเครื่อง Scratch Tester Model: RST ทดสอบแรง LC1, LC2 และ LC3 วัสดุเหล็ก X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 บนพื้นผิวแต่ละสารเคลือบ CrN, TiN และ AlCrN มีผลดังนี้

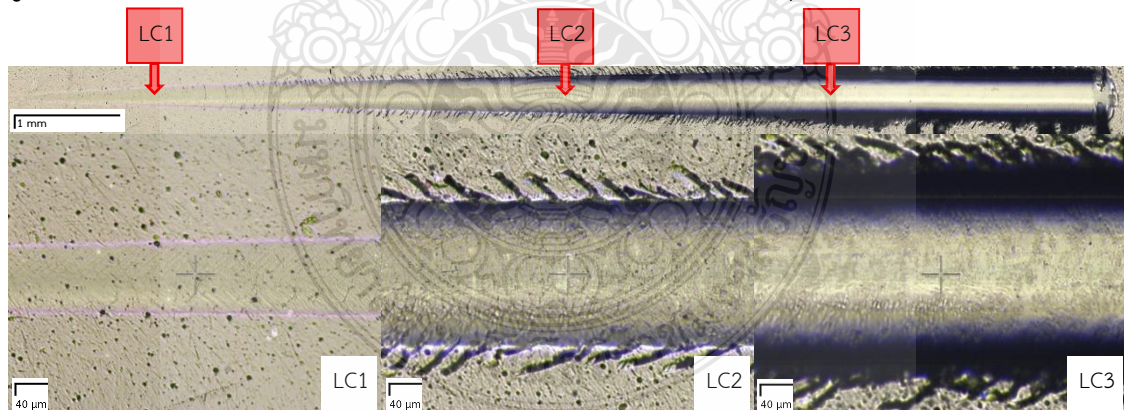
รอยขีดทดสอบจากรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 และผลการทดสอบ Scratch Test ของสารเคลือบ CrN จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าเหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้สารเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.47 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69.99 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 124.01 นิวตัน เหล็ก X90CrMoV7-2 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้สารเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.18 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 78.45 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 130.98 นิวตัน และเหล็ก X140CrVW6-3-3 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้สารเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.55 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66.65 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 105.02 นิวตัน



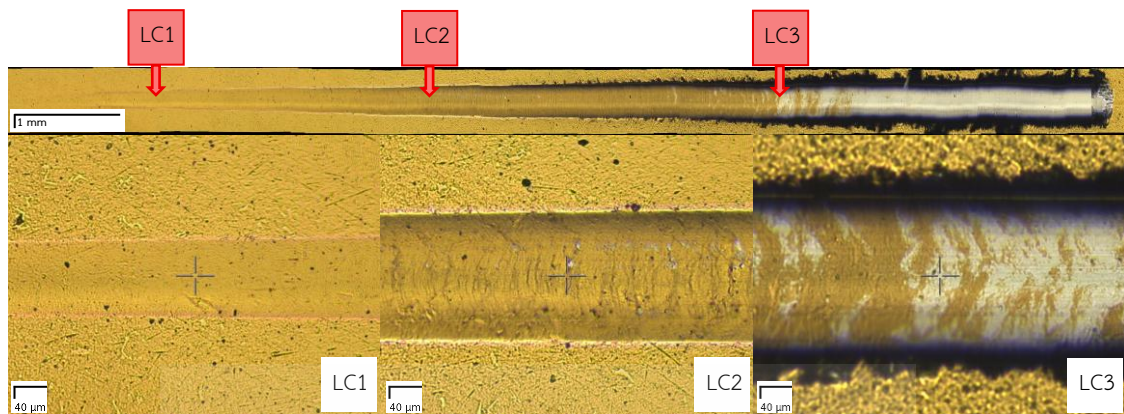
รูปที่ 4.20 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1



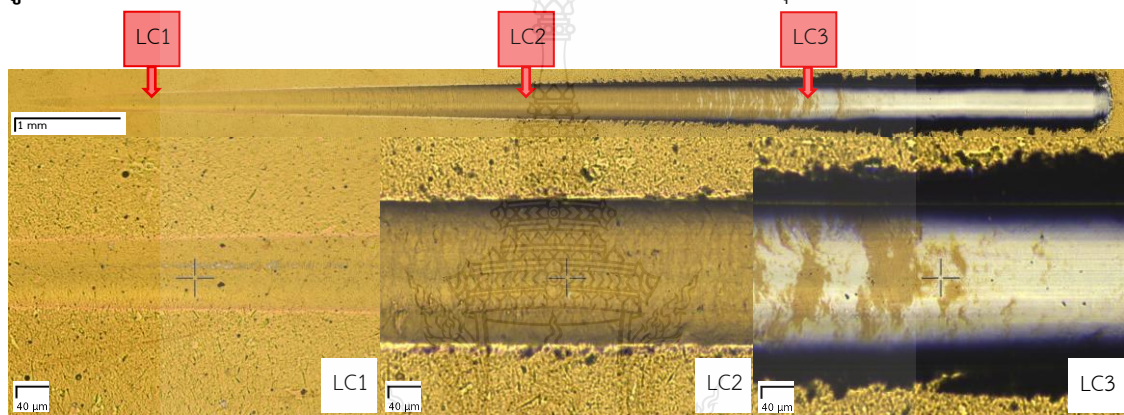
รูปที่ 4.21 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X90CrMoV7-2



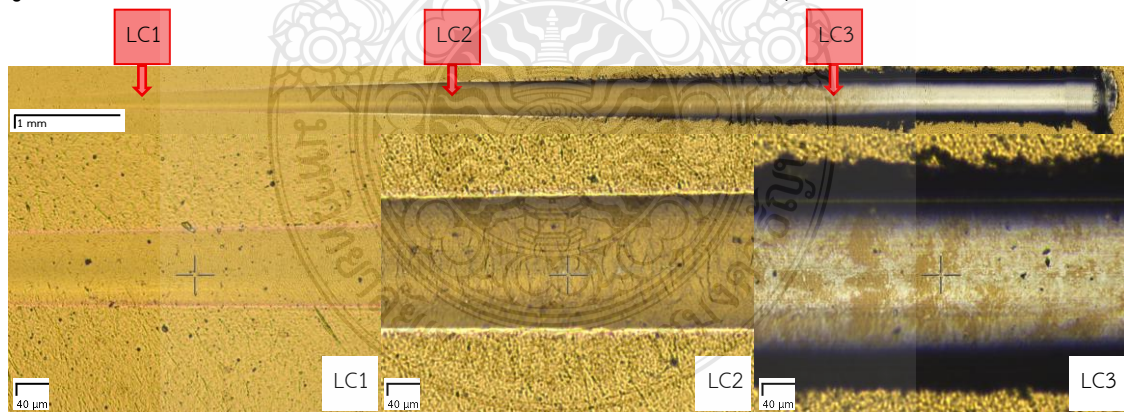
รูปที่ 4.22 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ CrN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3



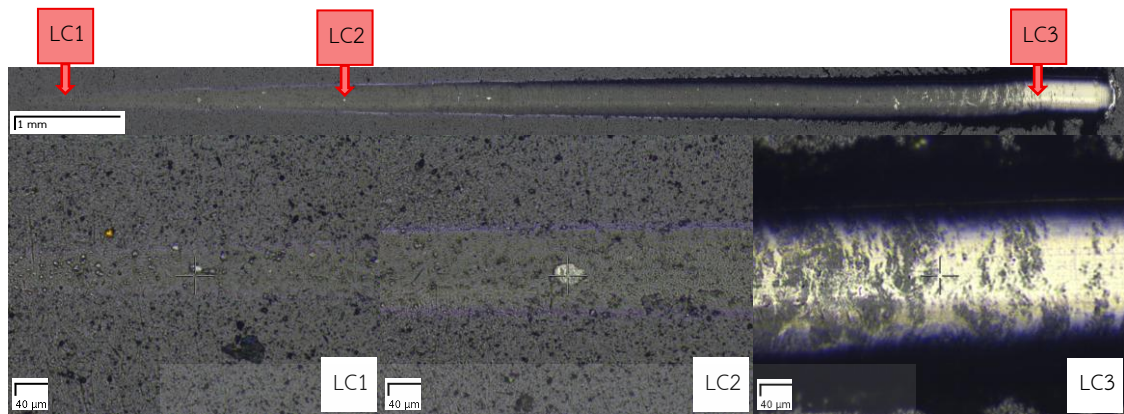
รูปที่ 4.23 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1



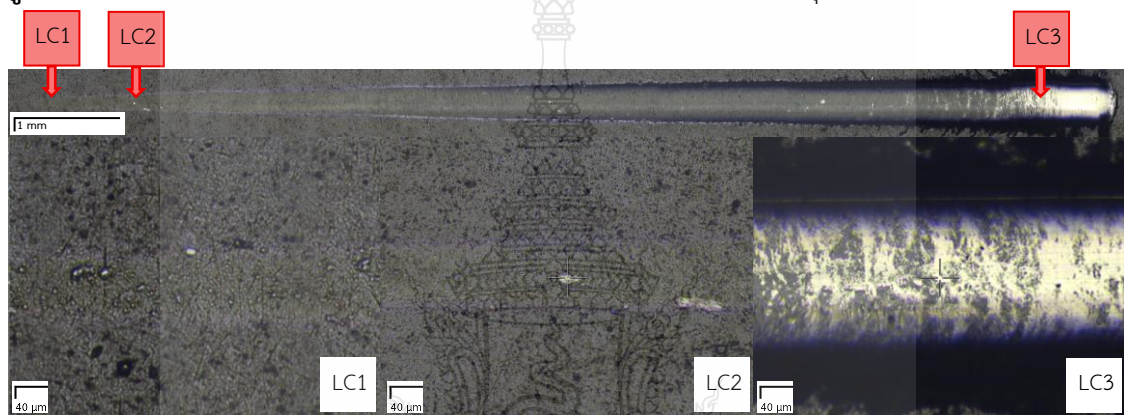
รูปที่ 4.24 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X90CrMoV7-2



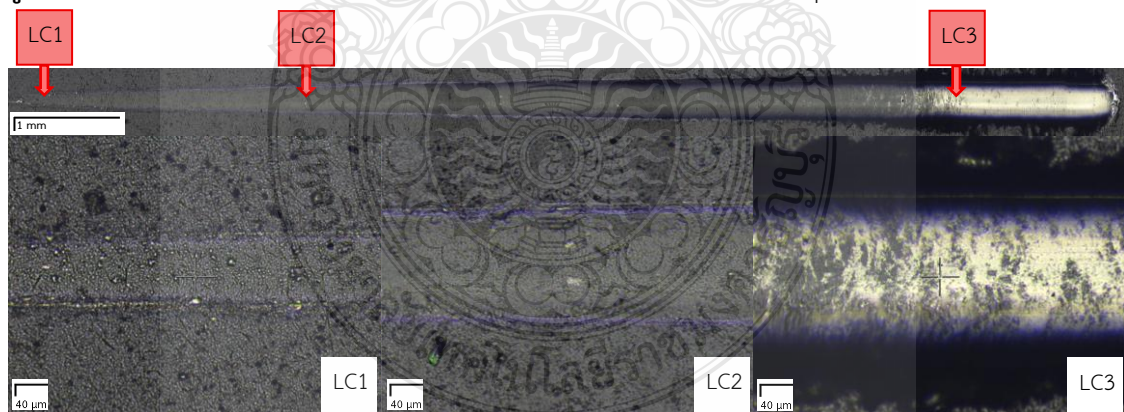
รูปที่ 4.25 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ TiN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3



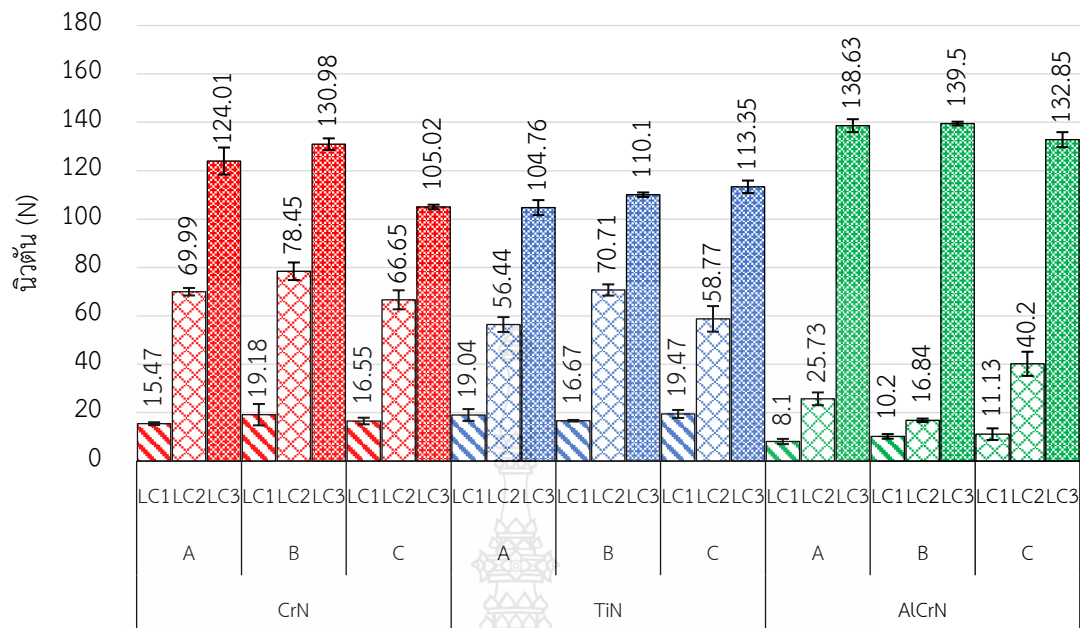
รูปที่ 4.26 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X110CrMoV8-2-1



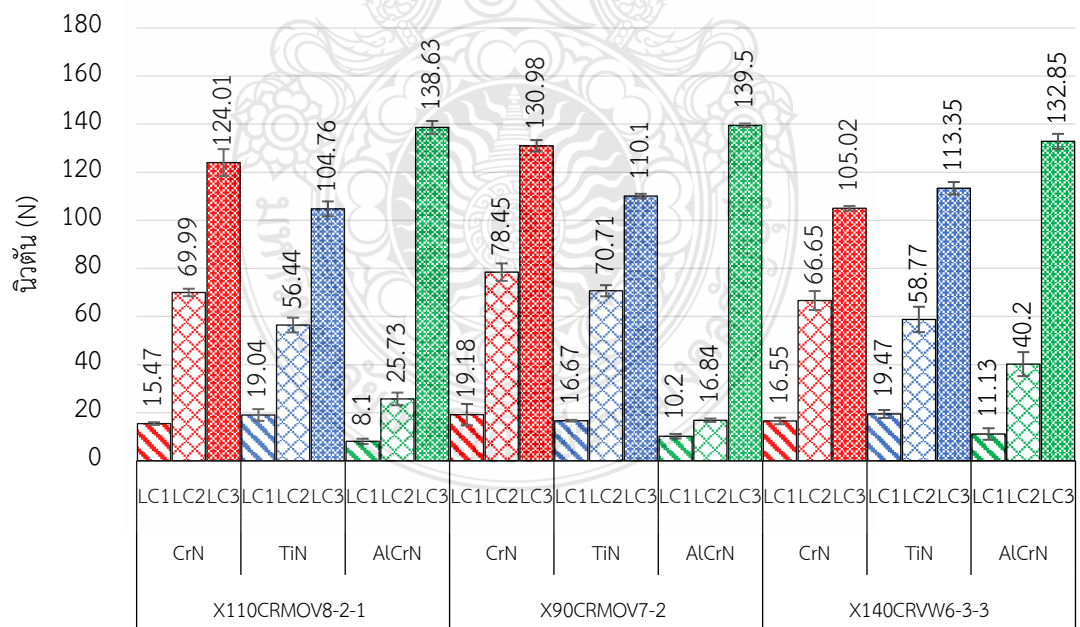
รูปที่ 4.27 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X90CrMoV7-2



รูปที่ 4.28 การทดสอบ Scratch Test ที่พื้นผิวสารเคลือบ AlCrN บนวัสดุ X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการทดสอบ Scratch Test แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการทดสอบ Scratch Test แบ่งตามชนิดโลหะ

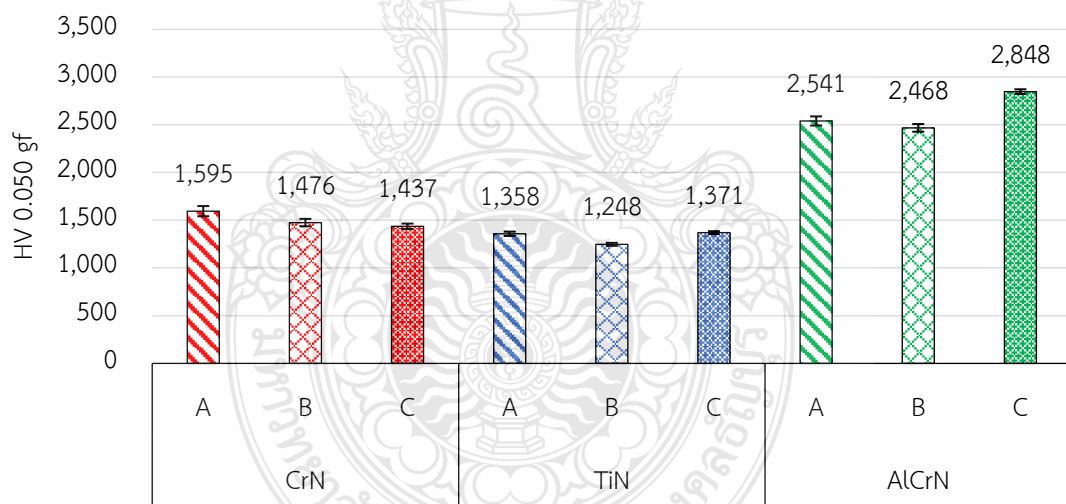
รอยขีดทดสอบจากรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 และผลการทดสอบ Scratch Test ของสารเคลือบ TiN จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าเหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.04 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 56.44 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 104.76 นิวตัน เหล็ก X90CrMoV7-2 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.67 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70.71 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1110.10 นิวตัน และเหล็ก X140CrVW6-3-3 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.47 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.77 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 113.35 นิวตัน

รอยขีดทดสอบจากรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 และผลการทดสอบ Scratch Test ของสารเคลือบ AlCrN จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าเหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.73 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 138.63 นิวตัน เหล็ก X90CrMoV7-2 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.20 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.84 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 139.50 นิวตัน และเหล็ก X140CrVW6-3-3 พบว่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำการเคลือบมีความบกพร่อง หรือค่า LC1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.13 นิวตัน แรงกระทำวิกฤตที่ทำให้พบรอยลอกของผิวเคลือบ หรือค่า LC2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40.20 นิวตัน และแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้สารเคลือบลอกอย่างสมบูรณ์ หรือค่า LC3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 132.85 นิวตัน

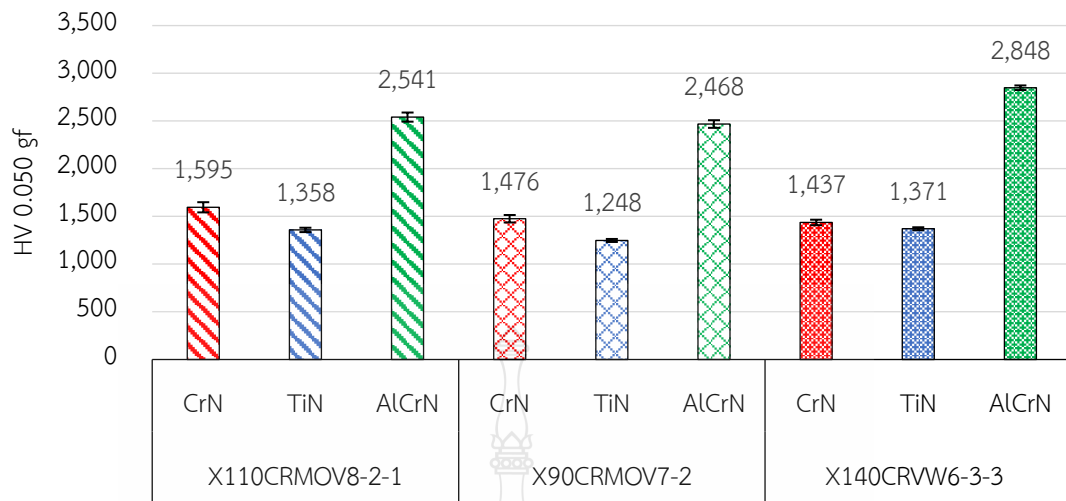
จากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ค่า LC1 และ LC2 ทุกสารเคลือบในชนิดเหล็ก X110CrMoV8-2-1 และ X90CrMoV7-2 มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน แต่เหล็ก X140CrVW6-3-3 มีค่าน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ AlCrN มีการสึกหรอของสารเคลือบได้ง่ายกว่าสารเคลือบ CrN และ TiN ในแรงกระทำน้อยและปานกลาง แต่ค่า LC3 ในเหล็กทั้ง 3 ชนิด บนสารเคลือบ AlCrN พบว่ามีค่ามากกว่าในทุกๆ เหล็กด้วยสารเคลือบ CrN และ TiN แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงกระทำมาก สารเคลือบ AlCrN จะมีการสึกหรอของสารเคลือบได้ยากกว่าสารเคลือบ CrN และ TiN ดังนั้น สารเคลือบ AlCrN

จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงกดสูง และจากการศึกษาความสามารถในการยึดเกาะของสารเคลือบแข็งบนพื้นผิววัสดุต่าง ๆ พบว่า ค่า LC3 ที่สูงที่สุดเป็นตัวชี้วัดสำคัญของความสามารถในการต้านทานแรงกดและการยึดเกาะของฟิล์มที่ดีที่สุด [38] ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ AlCrN มีค่า LC3 สูงสุดที่ 139.50 นิวตัน และมีอายุการใช้งานดวงตราที่เคลือบผิวด้วยสาร AlCrN โดยรวม มีค่าสูงกว่าสารเคลือบ TiN และ CrN ทุกเงื่อนไข มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dalibon และคณะ (2024) [24] ผลการทดสอบรอยขีดข่วน (Scratch Test) สามารถทนต่อการระลอกได้สูง และไม่แสดงการหลุดลอกของฟิล์มจากความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้นของ AlCrN นอกจากนี้ A. Gilewicz et al. [39] ระบุว่าสารเคลือบ AlCrN มีโครงสร้างที่หนากว่าสารเคลือบ CrN ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะและต้านทานต่อแรงกดสูงได้ดีขึ้น ดังนั้น การเลือกใช้สารเคลือบที่มีค่า LC3 สูง บน AlCrN จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของสารเคลือบสามารถรับแรงกดสูงได้ดีกว่า

4.3.4 ค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness)



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) แบ่งตามชนิดสารเคลือบ (A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) แบ่งตามชนิดโลหะ

ผลการทดสอบค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 เหล็ก X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 บนสารเคลือบ CrN พบว่ามีค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,595 HV, 1,476 HV และ 1,437 HV ตามลำดับ สารเคลือบ TiN พบว่ามีค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,595 HV, 1,476 HV และ 1,437 HV ตามลำดับ และสารเคลือบ AlTiN พบว่ามีค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,541 HV, 2,468 HV และ 2,848 HV ตามลำดับ

จากการวัดค่าความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness) แสดงให้เห็นว่าเคลือบ AlCrN ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดในทุกชนิดเหล็ก โดยเฉพาะกับเหล็ก X140CrVW6-3-3 มีค่าความแข็งถึง 2,848 HV ซึ่งหมายความว่าสารเคลือบ AlCrN มีคุณสมบัติเชิงกลความแข็งผิวเคลือบที่เหนือกว่าทั้ง CrN และ TiN มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Montwedi และคณะ (2024) [23] ได้นำเสนอว่าสารเคลือบ AlCrN มีความแข็ง 2371 ± 250 HV ซึ่งสูงกว่า TiN ที่มีความแข็ง 1991 ± 211 HV

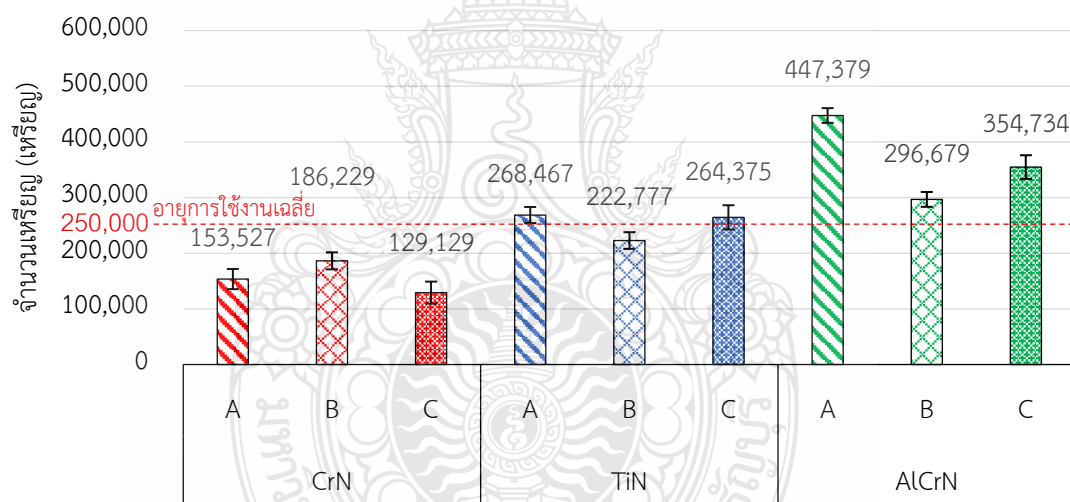
4.3.5 อายุการใช้งานดีตรา (Tool Life)

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.33 การทดลองดีตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท ด้วยเหล็กทั้ง 3 ชนิด และเคลือบผิว PVD 3 ชนิด ดีตราลงบนเหรียญตัวเปล่าจริง พบว่าสารเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานได้อย่างชัดเจนในทุกๆ ชนิดเหล็ก โดยเหล็ก X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 และ X140CrVW6-3-3 บนสารเคลือบ CrN พบว่ามีค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยเท่ากับ 153,527, 186,229 และ 129,129 ตามลำดับ สารเคลือบ TiN พบว่ามีค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยเท่ากับ 268,467, 222,777 และ 264,375 ตามลำดับ และสารเคลือบ AlCrN พบว่ามีค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยเท่ากับ 447,379, 296,679 และ 354,734 ตามลำดับ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ AlCrN มีอายุการใช้งานสูงสุดบนเหล็ก

X110CrMoV8-2-1 ในขณะเดียวกันงานวิจัยของ Torsakul S. และ Kuptasthien N. (2024) [20] ได้สรุปว่าการเคลือบ CrN ให้ความแข็งแรงและการยึดเกาะที่ดีกว่า TiN ซึ่งเป็นข้อสรุปที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตาม อายุการใช้งานจากการทดลองในครั้งนี้ มีผลขัดแย้งที่อาจเกิดจากเหรียญตัวเปล่าโลหะต่างชนิด และแรงกดที่มากกว่าในการขึ้นรูปเหรียญภาษาปณณเวียนชนิดราคา 10 บาท

ตารางที่ 4.11 แสดงอายุการใช้งานเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

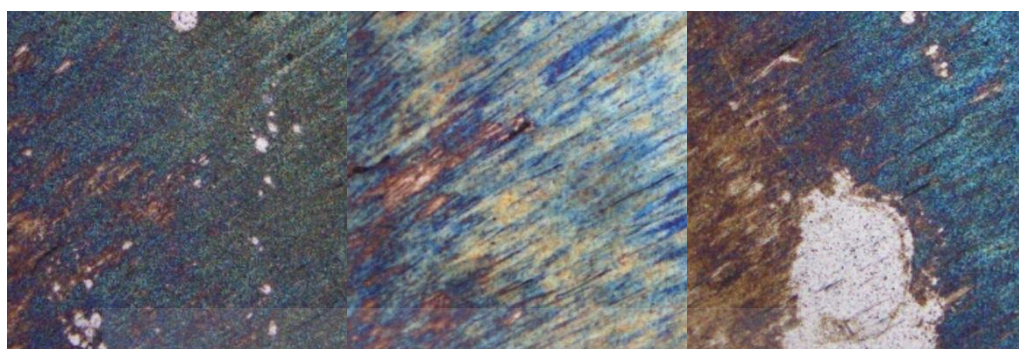
Steel	Coating		
	CrN	TiN	AlCrN
X110CrMoV8-2-1	153,527	268,467	447,379
X90CrMoV7-2	186,229	222,777	296,679
X140CrVW6-3-3	129,129	264,375	354,734



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงอายุการใช้งานเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แบ่งตามชนิดสารเคลือบ

(A) X110CrMoV8-2-1 (B) X90CrMoV7-2 (C) X140CrVW6-3-3

สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังจากหมดอายุการใช้งานของดวงตราแต่ละดวงนั้น ผู้วิจัยจะตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังรูปที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 เพื่อวิเคราะห์การสึกหรอที่นำไปสู่การหมดอายุการใช้งานของดวงตราในแต่ละดวง โดยมีผลวิเคราะห์พร้อมรูปภาพ ดังนี้



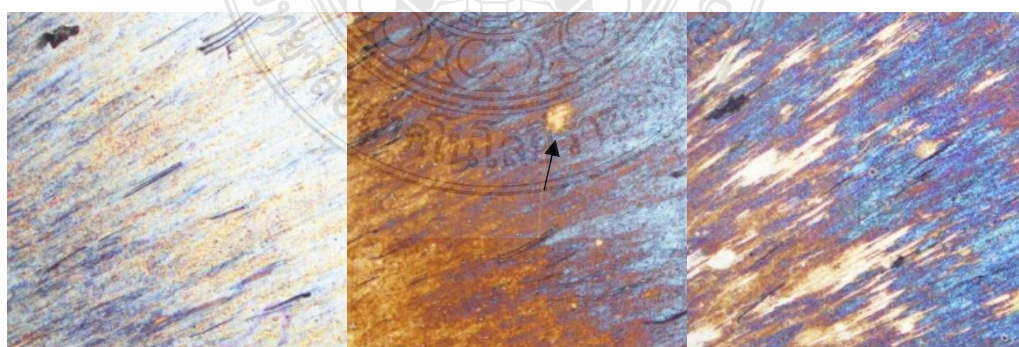
(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.34 พื้นผิวของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1
(b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 หลังใช้งาน (กำลังขยาย 40 เท่า)

จากรูปที่ 4.34(a) เป็นภาพพื้นผิวของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ของเหล็กทั้ง 3 ชนิด พบว่าพื้นผิวมีลักษณะพบการสึกหรอเป็นกลุ่มก้อนกลมสีขาวก่อให้เกิดตำหนิบนดวงตราและส่งผลกระทบต่อเหรียญโดยตรง และมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.34(c) แต่ลักษณะก้อนกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นตำหนิที่เห็นจากด้วยสายตาได้ มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ Scratch Test ที่เหล็ก X110CrMoV8-2-1 และ X140CrVW6-3-3 มีค่าน้อยกว่า X90CrMoV7-2 และรูปที่ 4.34(b) มีลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากติตราลักษณะจากการขัดถู (Abrasive Wear) มีทิศทางไปในแนวกับการยึดตัวของเหรียญตัวเปล่า ซึ่งเมื่อมองภาพรวมแล้ว รูป 4.34(a) และ 4.34(c) จะเห็นว่าเรียกว่า 4.34(b) มีผลที่สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงความหยาบหลังดีที่น้อยลงกว่าเดิม แต่อายุการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าเหล็ก X90CrMoV7-2 มีค่ามากกว่า X110CrMoV8-2-1 และ X140CrVW6-3-3 โดยมีอายุเฉลี่ยประมาณ 180,000 เหรียญ ซึ่งสอดคล้องกับการสึกหรอตำหนิที่เห็นจากด้วยสายตาได้ เป็นเหตุผลหนึ่งที่สำคัญ จึงต้องหยุดการใช้งานดวงตราที่ส่งผลกระทบต่อความสวยงามของเหรียญได้



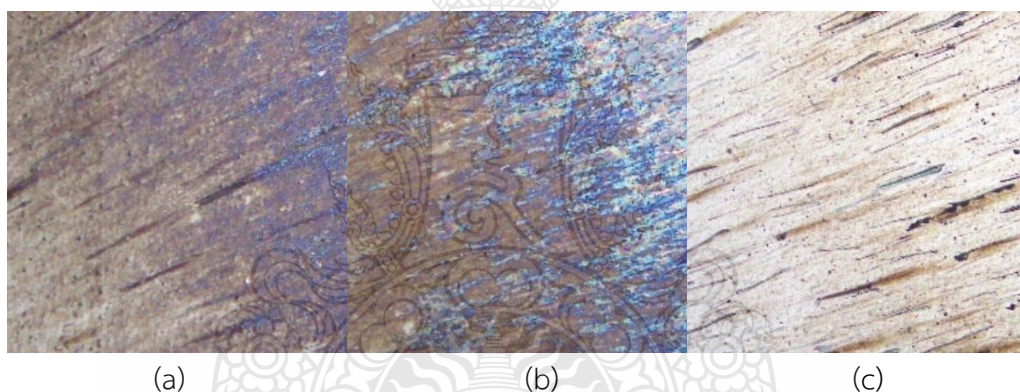
(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.35 พื้นผิวของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1
(b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 หลังใช้งาน (กำลังขยาย 40 เท่า)

จากรูปที่ 4.35(a)(b) และ(c) เป็นภาพพื้นผิวของสารเคลือบ TiN ของเหล็กทั้ง 3 ชนิด พบว่าพื้นผิวมีมีลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากดีตราลักษณะจากการขัดถู (Abrasive Wear) มีทิศทางไปในแนวกับการยึดตัวของเหรียญตัวเปล่า และรูปที่ 4.35(b) พบตำหนิการหลุดร่อนของสารเคลือบเป็นลักษณะกลม ทำให้เกิดตำหนิแปลกปลอม จากรูปที่ 4.35(c) มีการหลุดลอกของสารเคลือบที่ค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อมองภาพรวมแล้วผิวมีความหยาบมากกว่ารูปที่ 4.35(a) และ 4.34(b) มีความสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงความหยาบหลังตีของเหล็ก X140CrVW6-3-3 มากถึง 0.142 ไมโครเมตร อีกทั้งพบว่าการหลุดลอกทั้ง 3 ชนิดเหล็กกับค่า Scratch Test มีค่าที่น้อยกว่าสารเคลือบ CrN ทุกชนิดเหล็กทั้งหมด จึงเห็นได้ว่าพื้นที่ที่แสดงในรูปที่ 4.35(a)(b) และ(c) เห็นเป็นสีขาวเป็นพื้นเนื้อโลหะ อาจเกิดจากการรับแรงกระแทกได้ไม่ดีกว่าสารเคลือบ CrN แต่กลับพบว่าไม่พบเจอตำหนิแปลกปลอมที่ชัดเจนที่อาจจะก่อบนผิวเหรียญ ด้วยเหตุข้างต้นนี้จึงทำให้อายุการใช้งานในสารเคลือบ TiN ในทุกชนิดมีค่าสูงกว่า CrN ซึ่งมีอายุการใช้งานรวมกันเฉลี่ยประมาณ 250,000 เหรียญ



รูปที่ 4.36 พื้นผิวของสารเคลือบอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) บนวัสดุเหล็ก (a) X110CrMoV8-2-1 (b) X90CrMoV7-2 (c) X140CrVW6-3-3 หลังใช้งาน (กำลังขยาย 40 เท่า)

จากรูปที่ 4.36(a)(b) และ(c) เป็นภาพพื้นผิวของสารเคลือบ AlCrN ของเหล็กทั้ง 3 ชนิด พบว่าพื้นผิวมีมีลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากดีตราลักษณะจากการขัดถู (Abrasive Wear) ชัดมีทิศทางไปในแนวกับการยึดตัวของเหรียญตัวเปล่า และรูปที่ 4.35(a) พบการสึกหรอจากการขีดน้อยกว่าอีก 2 ชนิดเหล็ก และรูปที่ 4.35(b) พบตำหนิการหลุดลอกเยอะกว่าชนิดเหล็กอื่นๆ แต่ไม่มากกว่าในสารเคลือบชนิดอื่น และรูปที่ 4.35(c) พบพื้นผิวเม็ด Carbide อย่างชัดเจนทำให้ผิวดวงตราไม่สวยงาม คาดว่าเป็นผลจากเหล็กที่มีความเค้นตกค้างสูงถึง -180 MPa นำไปสู่การเกิดเศษฝุ่นโลหะ และรอยแปลกปลอมบนผิวดวงตรา ในช่วงแรกผิวดวงตราอาจยังเรียบ แต่เมื่อคาร์ไบด์เริ่มปรากฏขึ้นมาเป็นเม็ดใหญ่ จะก่อให้เกิดเศษฝุ่นโลหะหรือรอยแปลกปลอมที่ส่งผลต่อคุณภาพของเหรียญ และรูป

ที่ 4.35(a) ด้วยผลการทดสอบทั้งหมดมีผลสอดคล้องในทุกๆ ด้าน จึงทำให้สารเคลือบ AlCrN เหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีอายุการใช้งานมากที่สุดเฉลี่ยประมาณ 450,000 ชั่วโมง

การหลุดร่อนของสารเคลือบ AlCrN ในกระบวนการตีตรา เกิดจากความเค้นตกค้างภายในฟิล์ม ร่วมกับแรงกดซ้ำและการเสียดสีของผิวงาน ทำให้เกิด micro-cracks และ delamination โดยเฉพาะบริเวณขอบคมของแม่พิมพ์ กลไกสำคัญมาจากความไม่สม่ำเสมอของแรงถ่ายโอนระหว่างฟิล์ม AlCrN กับวัสดุแม่พิมพ์ เนื่องจากความแตกต่างของความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่น ฟิล์มที่มีความเค้นตกค้างสูงและโครงสร้างไม่สมดุลจะเกิดการแยกตัวของชั้นเคลือบได้ง่าย Kohlscheen & Shibata [40] กล่าวว่าสารเคลือบผิว AlCrN แสดงให้เห็นว่าความเค้นตกค้างและองค์ประกอบของสารเคลือบมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการต้านทานการหลุดร่อน (Delamination) ภายใต้แรงกดซ้ำ

จากสภาพพื้นผิวหลังใช้งานจะเห็นได้ว่าการเคลือบ AlCrN บนเหล็ก X110CrMoV8-2-1 นั้นมีการสึกหรอน้อยที่สุดในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบ CrN บนเหล็ก X140CrVW6-3-3 สารเคลือบ CrN พบการสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear) มากกว่าและรอยมีความลึกกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลอายุการใช้งานของดวงตราเหล็ก X110CrMoV8-2-1 สารเคลือบ AlCrN มีอายุการใช้งานมากที่สุด และเหล็ก X140CrVW6-3-3 สารเคลือบ CrN มีอายุการใช้งานน้อยที่สุด เป็นผลกระทบต่อคุณภาพด้านความคมชัดสวยงาม และโทนสีความเงาหรือโทนสีความด้านของเหรียญสำเร็จ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญด้านคุณภาพของเหรียญกษาปณ์ในปัจจุบัน งานวิจัยของ Carneiro, E. และคณะ [21] การทดลองครั้งนี้ก็ยืนยันว่าสารเคลือบ CrAlN มีความสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียวกว่า CrN สามารถทนต่อแรงกระแทกซ้ำๆ ได้โดยไม่เกิดรอยร้าวหรือการลอกของสารเคลือบ แม้ในสถานะที่มีแรงกระแทกสูงกว่าที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต และงานวิจัยของ AY Adesina และคณะ [22] สารเคลือบ AlCrN มีความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่า TiN และ CrN และเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาชนิดสารเคลือบผิวที่มีผลต่อการสึกหรอของดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท และเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานดวงตราด้านหน้าเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 10 บาท ให้ได้มากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลปัญหาจากการใช้งานดวงตรา พบว่ามีปัญหา PVD ลอกที่ลวดลาย จึงได้ทำการทดลองด้วยชนิดเกรตเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steels) X90CrMoV7-2, X110CrMoV8-2-1 และ X140CrVW6-3-3 และสารเคลือบ 3 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (CrN) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และอลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) เพื่อเปรียบเทียบการใช้งาน พร้อมทั้งทดสอบในด้านต่างๆ ซึ่งต้องให้อายุการใช้งานดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนได้มากขึ้นกว่าเดิม

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลจากการทดสอบดวงตรา

- 1) โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก X110CrMoV8-2-1 มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ละเอียด และการกระจายตัวของคาร์ไบด์ที่สม่ำเสมอ มีความเค้นตกค้างหลังชุบแข็ง (As Temper) ต่ำที่สุด และมีอายุการใช้งานมากที่สุดบนสารเคลือบ AlCrN
- 2) สารเคลือบ AlCrN ซึ่งมีค่าความแข็งผิวสูงสุดบนเหล็ก X140CrVW6-3-3 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยถึง 2,848 HV ซึ่งสูงกว่าสารเคลือบ CrN และ TiN อย่างเห็นได้ชัด
- 3) การทดสอบ Scratch Test พบว่าสารเคลือบ AlCrN มีค่าแรงกระทำวิกฤตสูงสุดในระดับแรงที่มากกว่าสารเคลือบ CrN และ TiN โดยเฉพาะค่า LC3 ที่มีค่าสูงกว่า
- 4) โดยสารเคลือบ AlCrN สามารถรักษาความหยาบผิวได้ดีกว่าสารเคลือบ TiN และ CrN
- 5) พบว่าโครงสร้างและผิวฟิล์มเคลือบแต่ละชนิดมีผลต่อความขรุขระ และการเกิด Self-Polishing Effect โดยเฉพาะสารเคลือบ CrN และ AlCrN จากการแสดงค่าลดลงของความหยาบผิว เป็นผลจากความเงาของพื้นผิวในช่วงหลังของการใช้งาน ทำให้ดวงตรายังคงความเงาในเกณฑ์ควบคุมการผลิตเหรียญ
- 6) การทดสอบ Adhesion test ตามมาตรฐาน VDI 3198 พบว่าสารเคลือบ AlCrN และ TiN มีการยึดเกาะที่ดีมาก โดยไม่มีรอยแตกร่อนของชั้นเคลือบ

7) อายุการใช้งานของสารเคลือบ AlCrN บนเหล็กเกรด X110CrMoV8-2-1 ให้ผลลัพธ์ อายุการใช้งานเฉลี่ยสูงสุดถึง 447,379 ครั้ง ซึ่งสูงกว่าสารเคลือบ TiN และ CrN ขณะที่เหล็ก X90CrMoV7-2 และ X140CrWV6-3-3 ที่เคลือบด้วย AlCrN ก็ยังมีอายุการใช้งานสูงกว่าสารเคลือบอื่นๆ

5.1.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในทุกการทดสอบ มีความสอดคล้องกับอายุการใช้งาน ที่ตรงจริง และผลทางสถิติยังมีผลการทดสอบไปในทางเดียวกันในทุกๆ วิธีการการทดสอบค่าต่างๆ

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์การทดสอบดวงตรา การทดสอบด้านสถิติ และผลอายุการใช้งาน จะเห็นได้ว่าสารเคลือบ AlCrN บนเหล็กเกรด X110CrMoV8-2-1 พบการสึกหรอน้อยที่สุด และสามารถเพิ่มอายุการใช้งานดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 10 บาท ได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทดลองเคลือบสาร PVD อื่นๆ หรือการเคลือบผิวที่มากกว่าหนึ่งชั้น เพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานดวงตราในเหรียญชนิดราคาอื่นๆ หรือเหรียญอื่นๆ

5.2.2 ควรทดลองและศึกษาการเคลือบผิวแบบ Duplex PVD เพิ่มความแข็งของเนื้อวัสดุ (Surface Hardness) และทำให้ชั้นเคลือบ PVD ยึดเกาะได้ดีขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาในวัสดุโลหะเหล็กเกรดอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพได้ดีกว่าเดิม และต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าในด้านต่างๆ ไม่เพียงแต่พิจารณาด้านราคาของวัสดุเป็นหลัก

บรรณานุกรม

- [1] S. Muangnil, "Inaugural Issue Volume 1," 2020, Available:
- [2] R. T. Mint. *Current Circulating Coins of the Reign of King Rama X (online)*, Available: https://www.royalthaimint.net/ewtadmin/ewt/mint_web/ewt_news.php?nid=784
- [3] B. Sresomroeng, P. Chumrum, & V. Premanond, "Residual Stress Measurement for Coated Film on Cold Work Tool Steel," *Advanced Materials Research*, vol. 299-300, pp. 1136-1141, 2011.
- [4] S. Gowthama, S. S. Bhattacharya, P. Venugopal, & R. Natarajan, "Coining Test for Evaluation of Tool Performance," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 64, no. 4-5, pp. 359-363, 2011.
- [5] Z. Keran, M. Math, M. Skunca, F. Barlat, Y. H. Moon, & M. G. Lee, "Coining as a microforming process," 2010.
- [6] Y. Bocharov, S. Kobayashi, & E. Thomsen, "The mechanics of the coining process," 1962.
- [7] D. Jakubčzyová, D. Kalincová, & R. Kaštan, "Testing of PVD Hard Coatings Applied to Coining Dies," in *Materials Science Forum*, 2015, vol. 818: Trans Tech Publ, pp. 27-31, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.818.27>.
- [8] M. Tavodová, P. Beno, J. Luptáková, D. Stančková, N. Náprstková, & K. Monkova, "Root cause analysis of coining tool failure with proposed solution to extend its service life," *Engineering Failure Analysis*, vol. 162, 2024.
- [9] J. L. Mo, M. H. Zhu, A. Leyland, & A. Matthews, "Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 215, pp. 170-177, 2013.
- [10] J. Mo, M. Zhu, B. Lei, Y. Leng, & N. Huang, "Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 1423-1429, 2007.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] W. Onkratong, "Study of Tool Steels and Coating Materials on Stamping Dies of Two - Baht Coins." [Online]. Available: <http://www.repository.rmutt.ac.th/handle/123456789/3536>
- [12] ม. สติรจินดา, เหล็กกล้า, 5 ed.: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543.
- [13] ส. ปุคะภาค, วัสดุวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 2559.
- [14] D. M. Mattox, *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew, 2010.
- [15] M. C. Tanzi, S. Farè, & G. Candiani, "Chapter 5 - Sterilization and Degradation," in *Foundations of Biomaterials Engineering*, M. C. Tanzi, S. Farè, and G. Candiani Eds.: Academic Press, 2019, pp. 289-328.
- [16] J. S. Graeme *et al.*, การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม : ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [17] S. Surinphong & ส. สุรินทร์พงษ์, "Adhesion ของ PVD Hard Coating การวัด และ เกร็ดความรู้ที่เกี่ยวข้อง," วารสารแม่พิมพ์, vol. 21,22, 01/01 2009.
- [18] M. F. Othman, A. R. Bushroa, & W. N. R. Abdullah, "Evaluation techniques and improvements of adhesion strength for TiN coating in tool applications: a review," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 29, no. 7, pp. 569-591, 2015.
- [19] J. Outeiro, "Residual Stresses in Machining Operations," in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 2018, ch. Chapter 16811-1, pp. 1-13.
- [20] S. Torsakul & N. Kuptasthien, "Tool life improvement for stamping dies in the coining process," *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1-22, 2024.
- [21] E. Carneiro, J. D. Castro, S. M. Marques, A. Cavaleiro, & S. Carvalho, "REACH regulation challenge: Development of alternative coatings to hexavalent chromium for minting applications," *Surface and Coatings Technology*, vol. 418, 2021.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] A. Y. Adesina, Z. M. Gasem, & A. S. Mohammed, "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*, vol. 44, no. 12, pp. 10355-10371, 2019.
- [23] B. Montwedi, S. Jeje, & M. Shongwe, "Comparative Performance Evaluation of Magnetron Sputtered TiN, AlCrN, and TiAlCrN Coatings," *Science, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 45-55, 2024.
- [24] E. L. Dalibon, A. J. Maskavizan, & S. P. Brühl, "Tribological behaviour of TiAlN and AlCrN coatings on stainless steel," vol. 40, no. 2, pp. 178-188, 2024.
- [25] D. Özkan, Y. Erarslan, E. Sulukan, L. Kara, M. Alper Yılmaz, & M. B. Yağcı, "Tribological Behavior of TiAlN, AlTiN, and AlCrN Coatings at Boundary Lubricating Condition," *Tribology Letters*, vol. 66, no. 4, 2018.
- [26] B. Denkena, B. Breidenstein, H. Lucas, M. Keitel, W. Tillmann, & D. Stangier, "Influence of Residual Stresses in heat-treated High-Speed Steels on the Adhesion of CrAlN Coatings," *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, vol. 75, no. 3, pp. 163-176, 2020.
- [27] S. Farahany, M. Ziaie, & N. A. Nordin, "Effect of Triple Tempering Temperature on Microstructure, Mechanical, and Wear Properties of K340 Cold Work Tool Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 20, pp. 9000-9010, 2022.
- [28] P. Panjan, A. Drnovšek, & J. Kovač, "Tribological aspects related to the morphology of PVD hard coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 343, pp. 138-147, 2018.
- [29] M. Polok-Rubinić, L. A. Dobrzanski, & M. Adamiak, "Comparison of the PVD coatings deposited onto plasma nitrited steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 42, 2010.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] F. Kara & B. Öztürk, "Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel," *Sensor Review*, vol. 39, no. 1, pp. 24-33, 2019.
- [31] S. Saketi, J. Östby, & M. Olsson, "Influence of tool surface topography on the material transfer tendency and tool wear in the turning of 316L stainless steel," *Wear*, vol. 368-369, pp. 239-252, 2016.
- [32] J. Heinrichs, J. Gerth, U. Bexell, M. Larsson, & U. Wiklund, "Influence from surface roughness on steel transfer to PVD tool coatings in continuous and intermittent sliding contacts," *Tribology International*, vol. 56, pp. 9-18, 2012.
- [33] P. Panjan, A. Drnovšek, N. Mahne, M. Čekada, & M. Panjan, "Surface Topography of PVD Hard Coatings," *Coatings*, vol. 11, no. 11, 2021.
- [34] P. Carlsson & M. Olsson, "PVD coatings for sheet metal forming processes—a tribological evaluation," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 14-15, pp. 4654-4663, 2006.
- [35] J. L. Endrino, G. S. Fox-Rabinovich, & C. Gey, "Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 24, pp. 6840-6845, 2006.
- [36] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. Alexandre, J. S. Fecheira, & F. P. N. Silva, "Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel," *Wear*, vol. 476, 2021.
- [37] Y. Duo, J. Tang, Z. Zhao, Y. Shengyu, G. Li, & G. Zhu, "Discrimination of wear performance based on surface roughness parameters arithmetic mean height (Sa) and skewness (Ssk)," *Wear*, vol. 548-549, 2024.
- [38] A. Y. Adesina, "Tribological Behavior of TiN/TiAlN, CrN/TiAlN, and CrAlN/TiAlN Coatings at Elevated Temperature," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 8, pp. 6404-6419, 2022.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] A. Gilewicz *et al.*, "Influence of the Chemical Composition of AlCrN Coatings on Their Mechanical, Tribological, and Corrosion Characteristics," *Journal of Friction and Wear*, vol. 41, no. 5, pp. 383-392, 2020.
- [40] J. Kohlscheen & T. Shibata, "Phase and Residual Stress Evaluation of Dual-Phase Al70Cr30N and Al80Cr20N PVD Films," *Crystals*, vol. 9, no. 7, 2019.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ



ตารางที่ ก.1 ผลค่าความแข็งหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟ

เหล็ก	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5
X110CrMoV8-2-1	58	60	59	60	58
X90CrMoV7-2	58	59	60	58	60
X140CrVW6-3-3	59	58	58	60	60

หน่วย HRC

ตารางที่ ก.2 ผลความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

เงื่อนไข	เหล็ก	ค่าวัดได้	SD
ก่อนชุบแข็ง	X110CrMoV8-2-1	-207	18
	X90CrMoV7-2	-188	19
	X140CrVW6-3-3	-55	15
ชุบแข็งไม่อบคืนไฟ	X110CrMoV8-2-1	-140	19
	X90CrMoV7-2	-160	16
	X140CrVW6-3-3	-160	20
ชุบแข็งอบคืนไฟ	X110CrMoV8-2-1	-89	12
	X90CrMoV7-2	-123	16
	X140CrVW6-3-3	-180	19

หน่วย MPa

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบวัดความหยาบผิว (Roughness)

เหล็ก/สารเคลือบ		CrN			TiN			AlCrN		
X110CrMoV8-2-1	Before	0.222	0.179	0.193	0.131	0.137	0.132	0.221	0.216	0.139
	After	0.154	0.202	0.218	0.154	0.162	0.211	0.147	0.198	0.511
X90CrMoV7-2	Before	0.154	0.191	0.162	0.149	0.155	0.155	0.179	0.242	0.140
	After	0.174	0.152	0.202	0.185	0.188	0.171	0.174	0.230	0.176
X140CrVW6-3-3	Before	0.272	0.240	0.199	0.109	0.110	0.143	0.161	0.157	0.169
	After	0.239	0.203	0.213	0.262	0.296	0.231	0.128	0.135	0.154

หน่วยไมโครเมตร (µm)

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบวัดความแข็งพื้นผิวชั้นเคลือบ (Hardness)

Steel	Hardness HV								
	CrN			TiN			AlCrN		
X90CrMoV7-2	1,502	1,409	1,500	1,236	1,248	1,272	2,525	2,460	2,467
	1,500	1,505	1,470	1,240	1,250	1,260	2,520	2,460	2,464
	1,490	1,479	1,500	1,233	1,244	1,270	2,380	2,455	2,470
	1,400	-	-	1,224	-	-	2,479	-	-
X110CrMoV8-2-1	1,602	1,676	1,501	1,352	1,325	1,394	2,571	2,576	2,471
	1,680	1,620	1,580	1,355	1,333	1,388	2,575	2,576	2,576
	1,575	1,561	1,571	1,370	1,375	1,345	2,490	2,485	2,498
	1,588	-	-	1,346	-	-	2,590	-	-
X140CrVW6-3-3	1,408	1,439	1,501	1,352	1,393	1,366	2,886	2,808	2,847
	1,420	1,450	1,433	1,352	1,390	1,360	2,855	2,865	2,811
	1,409	1,415	1,428	1,360	1,382	1,383	2,840	2,869	2,847
	1,464	-	-	1,370	-	-	2,855	-	-

หน่วย HV 0.050 gf

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบวัดความต้านทานต่อการสึกหรอ (Scratch test)

สารเคลือบ	เหล็ก	ระดับ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
CrN	X110CrMoV8-2-1	LC1	14.85	15.58	15.98
		LC2	71.25	70.47	68.25
		LC3	127.54	126.92	117.57
	X90CrMoV7-2	LC1	22.74	20.56	14.24
		LC2	75.35	77.55	82.45
		LC3	132.86	131.8	128.28
	X140CrVW6-3-3	LC1	17.56	17.09	15.00
		LC2	69.09	68.75	62.11
		LC3	105.8	105.3	103.96
TiN	X110CrMoV8-2-1	LC1	20.12	20.76	16.24
		LC2	54.31	55.05	59.96
		LC3	102.32	103.71	108.25
	X90CrMoV7-2	LC1	16.98	16.32	16.71
		LC2	72.11	71.98	68.04
		LC3	109.65	109.49	111.16
	X140CrVW6-3-3	LC1	20.64	20.19	17.58
		LC2	60.65	62.86	52.80
		LC3	116.01	113.19	110.85
AlCrN	X110CrMoV8-2-1	LC1	9.2	8.05	7.05
		LC2	26.89	27.59	22.71
		LC3	140.55	139.76	135.58
	X90CrMoV7-2	LC1	9.8	11.28	9.52
		LC2	16.77	16.15	17.60
		LC3	140.13	138.64	139.73
	X140CrVW6-3-3	LC1	12.21	12.8	8.38
		LC2	42.32	43.78	34.50
		LC3	138.34	148.76	111.45

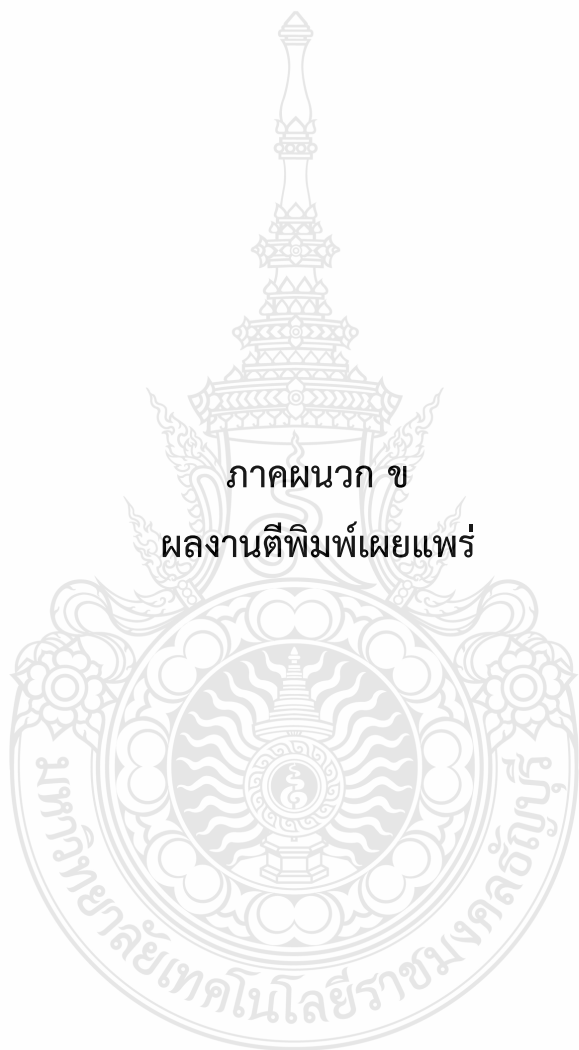
หน่วย : นิวตัน (N)

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบอายุการใช้งาน

สารเคลือบ	CrN			TiN			AlCrN		
เหล็ก	X110CrMoV8-2-1	X90CrMoV7-2	X140CrVW6-3-3	X110CrMoV8-2-1	X90CrMoV7-2	X140CrVW6-3-3	X110CrMoV8-2-1	X90CrMoV7-2	X140CrVW6-3-3
#1	184,215	175,411	93,000	268,795	211,235	234,938	452,361	290,639	376,128
#2	173,783	184,285	154,386	275,640	221,369	303,589	452,364	292,719	376,128
#3	145,214	175,547	140,000	246,598	246,569	254,599	433,156	323,054	330,330
#4	149,287	165,871	142,101	244,564	214,877	274,512	448,698	298,721	336,351
#5	158,921	192,363	122,251	254,145	201,546	284,412	451,045	310,288	372,519
#6	165,444	202,210	134,287	275,412	233,639	248,421	425,236	299,901	345,203
#7	136,566	194,518	145,899	282,400	212,536	275,122	466,243	274,599	352,014
#8	155,805	172,548	138,982	274,287	233,214	234,555	462,357	285,630	350,001
#9	122,514	183,354	102,106	281,254	241,256	265,547	450,125	300,010	324,521
#10	143,524	216,186	118,274	281,575	211,529	268,058	432,205	291,229	384,145

หน่วย : เหนียว

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



International Science Innovation Building,
Kyoto University, Yoshida Campus,
Kyoto, Japan
January 8-10, 2025

CONFERENCE PROCEEDINGS EMSES 2025

16th Eco-Energy and Materials Science
and Engineering Symposium

Special issue on Materials and Energy
in Negative and Neutral Carbon Society

Organized by



Sponsored by

公益財団法人
京都大学教育研究振興財団



Proceedings

16th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES 2025)
Special issue on Materials and Energy in Negative and Neutral Carbon Society

Conference Topics:

- Materials Science and Nano Technology (MN)
- Energy Technology (ET)
- Environmental Science (ES)
- Energy Society and Sustainability (ESS)
- Electric Vehicle Technology (EV)

Special Session:

- Generation and Application of High-Power Radiation Sources (GA)
- Nuclear Fusion (NF)

Organized by



- Kyoto University, Japan
- Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
- Kyoto Institute of Technology, Japan
- National Institute of Technology Kagawa College, Japan
- Silpakorn University, Thailand
- Association of Rajamangala Network of Manufacturing and Management Technology, Thailand
- The Materials Research Society of Thailand
- IEEE Technology & Engineering Management Society-Thailand Chapter

Sponsored by

公益財団法人
京都大学教育研究振興財団

EMSES Steering Committee

Honorary Advisory Chair:

Hideaki Ohgaki (Kyoto University, Japan)

Honorary Advisory Co-Chair:

Somma Pivsa-Art (RMUTT, Thailand)

General Chair:

Masato Katahira (Kyoto University, Japan)

General Co-Chair:

Krischonme Bhummkittipich (RMUTT, Thailand)

Organizing Committee:

Hiroshi Kamitakahara (Kyoto University, Japan)
Takashi Sagawa (Kyoto University, Japan)
Kazunobu Nagasaki (Kyoto University, Japan)
Hideaki Ohgaki (Kyoto University, Japan)
Eiji Nakata (Kyoto University, Japan)
Takeshi Yabutsuka (Kyoto University, Japan)
Yuji Aso (Kyoto Institute of Technology, Japan)
Kazushi Yamada (Kyoto Institute of Technology, Japan)
Hiroo Tarao (National Institute of Technology, Kagawa College, Japan)
Pramuk Unahalekhaka (RUS, Thailand)
Sorapong Pavasupree (RMUTT, Thailand)
Krischonme Bhummkittipich (RMUTT, Thailand)
Sumonman Niamlang (RMUTT, Thailand)
Supakij Suttiruengwong (Silpakorn University, Thailand)

International Advisory Committee:

Hideaki Ohgaki (Kyoto University, Japan)
Sommai Pivsa-Art (RMUTT, Thailand)
Hiroyuki Hama (Tohoku University, Japan)
Ken Miyata (Yamagata University, Japan)
Sadao Miura (Tohoku University, Japan)
Akihiko Goto (Osaka Sangyo University, Japan)
Naoki Sugiyama (Kyoto Institute of Technology, Japan)
Wisanu Pecharapa (KMUTL, Thailand)
Toshiya Muto (Tohoku University, Japan)
Tomoko Ota (Chuo Business Group, Japan)
Jakrapong Kaewkhao (NPRU, Thailand)
Pastraporn Thipayasothon (KMUTL, Thailand)
Trinet Yingsamphanchaoen (KMUTNB, Thailand)
Nipon Ketjoy (Naresuan University, Thailand)
Suthum Patumsawad (KMUTNB, Thailand)
Monchai Jitvisate (SUT, Thailand)
Sakhorn Rimjaem (Chiang Mai University, Thailand)
Sanchai Ramphueiphad (RMUTI, Thailand)

Hadarajah Mithulananthan (UQ, Australia)

Technical Program Chair:

Hideaki Ohgaki (Kyoto University, Japan)

Technical Program Co-Chairs:

Boonyang Plangklang (RMUTT, Thailand)

Technical Conference Committee:

Sorapong Pavasupree (RMUTT, Thailand)
Sirichai Dangeam (RMUTT, Thailand)
Anin Memon (RMUTT, Thailand)
Boonyang Plangklang (RMUTT, Thailand)
Amnoi Reungwaree (RMUTT, Thailand)
Sirichai Torsakul (RMUTT, Thailand)
Weraporn Pivsa-Art (RMUTT, Thailand)
Walanrak Poomchalit (RMUTT, Thailand)
Charnon Chupong (RMUTT, Thailand)
Monthon Nawong (RMUTT, Thailand)
Natee Srisawat (RMUTT, Thailand)
Therakanya Sripho (RMUTT, Thailand)
Nitikorn Junhuathon (RMUTT, Thailand)
Nathabhat Phankong (RMUTT, Thailand)

Local Arrangement Chair:

Takeshi Yabutsuka (Kyoto University, Japan)

Local Arrangement Co-Chair:

Nathabhat Phankong (RMUTT, Thailand)

Publicity and Website Committee:

Nathabhat Phankong (RMUTT, Thailand)
Prusayon Nintanavongsa (RMUTT, Thailand)
Somchai Biansoongnern (RMUTT, Thailand)

Registration Committee:

Weraporn Pivsa-Art (RMUTT, Thailand)
Walanrak Poomchalit (RMUTT, Thailand)
Warunee Ki-Aien (RMUTT, Thailand)

Financial Chair:

Hideaki Ohgaki (Kyoto University, Japan)

Financial Co-Chair:

Sirichai Torsakul (RMUTT, Thailand)

General Secretariat:

Nathabhat Phankong (RMUTT, Thailand)
Prusayon Nintanavongsa (RMUTT, Thailand)

List of Reviewers

Hideaki Ohgaki	Kyoto University, Japan
Hiroyuki Hama	Tohoku University, Japan
Apirat Laobuthee	Kasetsart University, Thailand
Yuttana Kumsuwan	Chiang Mai University, Thailand
Nathabhat Phankong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Krischonme Bhumkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Pimolpun Niamlang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand
Wissanu Charerntanom	Rajamangala University of Technology Isan, Thailand
Narongchai O-Charoen	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sumonman Niamlang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sirichai Torsakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Chatchai Veranitisagul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sorapong Pavasupree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Anin Memon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Natee Srisawat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sirichai Dangeam	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Saichol Chudjuarjeen	Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand
Chokchai Chuenwattanapraniti	Burapha University, Thailand
Prusayon Nintanavongsa	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Itarun Pitimon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Thanasin Bunnam	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sakhorn Rimjaem	Chiang Mai University, Thailand
Siriwan Pakluca	Chiang Mai University, Thailand
Araya Mungchamnankit	Rangsit University, Thailand
Atipong Bootchanont	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Rattikarn Khankrua	Suranaree University of Technology, Thailand
Teerin Kongpun	Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand
Napaporn Phuangpornpitak	Kasetsart University, Thailand
Uthen Kamnam	Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand
Monthon Nawong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Nitikorn Junhuathon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Suwat Sakulchat	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand
Watcharaphon Naklong	Rajamangala University of Technology Isan, Thailand
Nophawan Paradee	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Prapita Thanarak	Naresuan University, Thailand
Nithiwatthn Choosakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sommai Pivsa-Art	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Anyarat Watthanaphanit	Mahidol University, Thailand
Kulnida Taptim	Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand
Pramuk Unahalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand
Hikaru Yoshida	Kumamoto Industrial Research Institute, Japan
Sarawut Jaiyen	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Nophawan Paradee	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Akapon Phunpueok	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Chaiyan Chaiya	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Teeranan Nongnual	Burapha University, Thailand
Chularat Iamsamai	Chulalongkorn University, Thailand
Manop Yamfang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

Porakoch Sirisuwan	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Bawornkit Nekhamanurak	Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Rattikarn Khankrua	Silpakorn University, Thailand
Nu-orn Choothong	Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand
Nattaporn Khanonkon	Kasetsart University, Thailand
Voranuch Thongpool	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Sillawat Romphochai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Krawee Treemnuak	Suranaree University of Technology, Thailand
Prachoom Khamput	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Jatuphon Tangpagasit	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Saichol Chudjuarjeen	Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand
Pansa Liplap	Suranaree University of Technology, Thailand
Pinyo Puangmali	Chiang Mai University, Thailand
Nampueng Pangpaiboon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand



Improvement of a 10-Baht Circulation Coin's Die-Service Life Using AlCrN and TiN Coatings on Tool Steel

Suppakorn Saengkaew and Sirichai Torsakul*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thunyaburi, Pathum Thani, Thailand
Email: sirichai.to@cn.rmutt.ac.th*

Abstract— This study investigates methods to improve the die-service life of 10-Baht circulation coins by applying CrN, TiN, and AlCrN coatings using PVD technology on three tool steel grades: X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrVW6-3-3. Performance tests, including adhesion tests, scratch resistance, surface roughness measurements, and tool life evaluations, were conducted to assess coating durability. Results from the adhesion tests, roughness measurements, and tool life assessments revealed that the AlCrN coating provided the longest service life compared to the other coatings. The findings aim to enhance die longevity and production efficiency, providing a foundation for future research on other coin types.

Keywords—PVD coating, minting, tool steel, tool life, stamping die

I. INTRODUCTION

Circulation coins are vital for public, government, and private sector needs. The Royal Thai Mint ensures sufficient coin production for the economy, adhering to ISO 9001:2015 standards.[1] standards, ensuring quality control in terms of weight, size, and counterfeit prevention. Advanced machinery and modern technology are utilized to create intricate designs, while unique metal compositions are tailored for specific coin types. Currently, there are six denominations of circulation coins in Thailand: 10 Baht, 5 Baht, 2 Baht, 1 Baht, 50 Satang, and 25 Satang. [2]

Circulation coin production uses micro-forming with cold tool steel dies to create detailed patterns.[3-5] Friction reduction is a key factor in lowering the required pressing force [6], which can be improved through PVD coating. PVD coatings [7, 8] particularly AlCrN, have shown superior performance in extending the service life of coin dies. [9, 10]

The 10-Baht coin, introduced under King Rama X in 2018, has the shortest die service life, averaging 250,000 strikes, due to CrN coating delamination. While TiN coatings used under King Rama IX were discontinued for surface issues, evolving designs and materials now drive research into alternative coatings and tool steels for improved durability. [11]

This study explores the performance of AlCrN and TiN coatings applied using PVD technology on three tool steel grades: X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrVW6-3-3. Tests include adhesion, surface roughness, and tool life, along with minting trials to evaluate service life. The goal is to identify the optimal coating and material combination for 10-Baht coin dies. The findings will provide valuable insights for enhancing the production of other coin types, including commemorative coins and alternative metal compositions.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials for the experiment

The production of 10 Baht circulating coins requires die materials capable of withstanding high-speed cold forming processes at 700-750 coins per minute. Materials must

exhibit high formability, hardness in the range of 58-60 HRC, and toughness to endure forces of 180 tons during die hobbing and 80 tons during coin stamping. This study evaluated three steel grades: X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrVW6-3-3. The chemical composition of these three tool steels are shown in Table 1. These grades offer excellent toughness, wear resistance, and compatibility with high-pressure forming processes. The selected materials were tested for their ability to form precise patterns and maintain durability during production, ensuring suitability for long-term use in coin minting.

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF THREE EXPERIMENTAL TOOL STEEL MATERIALS.

Materials	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
X110CrMoV8-2-1	1.1	0.9	0.4	8.3	2.1	0.5	-
X90CrMoV7-2	0.9	0.9	0.5	7.8	2.5	0.5	-
X140CrVW6-3-3	1.4	-	-	6.4	1.5	3.7	3.5

B. Specimen Preparation Process

The preparation process for die specimens began with cutting steel of each grade using a band saw and machining it into cylindrical shapes with a diameter and length of 32 mm. One end was further shaped into an 80-degree cone and polished using abrasive paper and buffing wheels to achieve a smooth, controlled finish.

The cleaned specimens were patterned through a hobbing process using a Sack & Kiesselbach EP 630/30 hydraulic press with 180 tons of force. Afterward, the specimens were machined to precise dimensions.

Surface finishing involved sanding with 400-grit abrasive paper, polishing with a 6-micron diamond paste, and cleaning to remove residues. The specimens were then heat-treated in a Schmetz IU/IF 11 furnace to achieve optimal hardness levels suitable for coin striking. Each steel grade underwent specific heat-treatment cycles based on its properties.

Post-heat treatment, hardness testing was conducted using a diamond-tipped hardness tester, measuring at three points on each specimen. The surface was further polished to restore quality, followed by cleaning to prepare for coating.

Specimens were coated via Physical Vapor Deposition (PVD) using chromium nitride (CrN) or titanium nitride (TiN). For aluminum chromium nitride (AlCrN), the coating was outsourced due to equipment limitations. The coating process was monitored closely to ensure adherence to quality standards, including surface thickness, hardness, and adhesion. Testing and analysis confirmed the suitability of coatings for high-performance applications in minting 10 Baht coins.

C. Die Testing and Quality Control

After coating, adhesion testing was performed according to VDI 3198 standards to evaluate the bond strength of the coatings on the die surface. A GALILEO ERGOTEST COMP-25 hardness tester with a 120° conical diamond tip (spherical radius: 0.2 ± 0.015 mm) was used, applying a load of 150 kilogram-force. The results were categorized into adhesion levels HF1 to HF6, and further analysis was conducted using a microscope.

Surface roughness of the die patterns was measured using a Keyence VR-3000 3D scanner. Measurements were taken at three points on each specimen before and after use, with a cut-off length of 0.08 mm and an evaluation length of 4 mm, following ISO 4288 standards.

Minting trials were conducted using blank two-tone 10 Baht coin blanks and the obverse and reverse sides of the finalized coins are shown in Fig. 1, as specified in Table 2. Coin blanks were rimmed (coin rimming) and fed into a GRABENER automatic minting press operating at a speed of 700-750 coins per minute with a striking force of approximately 80 tons. Die performance was recorded, and any signs of wear or failure were documented for further analysis.



Fig. 1. 10-Baht Circulating Coin - Obverse and Reverse

The lifespan of the dies was monitored during production. When damage such as coating delamination, pattern wear, or cracks was detected, the affected dies were removed, and their condition was analyzed using a microscope.

Quality control was conducted in two stages. Coin blanks were inspected for size and pattern alignment before minting. During minting, three coins per batch were sampled to check pattern clarity and surface defects. Worn dies were replaced to maintain production standards.

TABLE 2. SPECIFICATIONS OF TWO-TONE BLANK COINS FOR 10 BAHT DENOMINATION

Specifications	Controlled Parameters
Outer Diameter	25.60±0.05 mm
Inner Diameter	18.15±0.1 mm
Edge Thickness	2.20±0.10 mm
Hardness	70-100 HV10

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Adhesion Test

The adhesion of the coatings was evaluated using the VDI 3198 standard (Rockwell C Indentation test), which classifies adhesion levels from HF1 to HF6. The specimens were examined under a microscope to identify cracking and delamination around the indentation area. The results indicated that chromium nitride (CrN) coatings on all three steel grades X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrVW6-3-3 exhibited minor cracking around the indentation area. However, no delamination was observed, suggesting acceptable adhesion despite visible cracking.

In contrast, titanium nitride (TiN) and aluminum chromium nitride (AlCrN) coatings on the same steel grades showed no visible cracking or damage. This indicates a stronger bond between the coatings and substrate materials for these two coatings. All coatings were rated HF1, signifying excellent adhesion performance under the VDI 3198 standard, as illustrated in

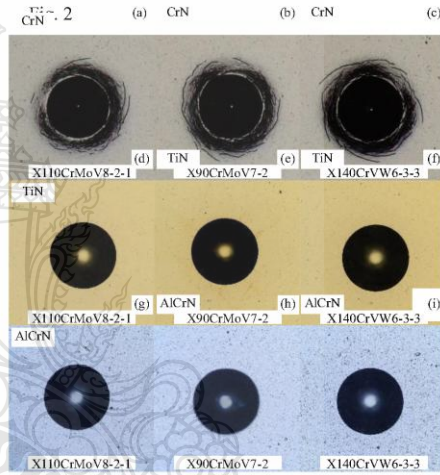


Fig. 2. Adhesion Test for a-c chromium nitride (CrN) d-f Titanium nitride (TiN) and g-i aluminum chromium nitride (AlCrN) of X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 and X140CrVW6-3-3, respectively, in order from left to right.

B. Surface Roughness

The experiment measured the surface roughness of CrN, TiN and AlCrN coatings on steel grades X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 and X140CrVW6-3-3 before and after stamping. The results revealed variations in roughness across coatings and substrates, highlighting the influence of both coating type and steel grade.

For CrN coatings, surface roughness on X110CrMoV8-2-1 decreased slightly from 0.198 μm to 0.191 μm after stamping, indicating minimal changes in surface conditions. On X90CrMoV7-2, there was a small increase from 0.169 μm to 0.176 μm , reflecting slight surface alterations. Conversely, on X140CrVW6-3-3, roughness decreased from 0.237 μm to 0.218 μm , suggesting improved smoothness during the stamping process.

For TiN coatings, X110CrMoV8-2-1 showed an increase in roughness from 0.133 μm to 0.176 μm , while X90CrMoV7-2 exhibited a similar increase from 0.153 μm to 0.181 μm . The largest increase occurred on X140CrVW6-3-3, where roughness rose significantly from 0.121 μm to 0.263 μm . This suggests that TiN notably affects surface roughness, especially on X140CrVW6-3-3, possibly due to its harder yet less ductile nature.

For AlCrN coatings, X110CrMoV8-2-1 exhibited a reduction in roughness from 0.192 μm to 0.185 μm , while X90CrMoV7-2 showed a slight increase from 0.187 μm to 0.193 μm . On X140CrVW6-3-3, roughness decreased markedly from 0.162 μm to 0.139 μm , demonstrating that AlCrN provides enhanced smoothness after stamping, likely due to its excellent resistance to surface deformation.

TABLE 3. VALUE OF ROUGHNESS TEST (μm)

Tool Steel	Coating	Before	After	Change
X110CrMoV8-2-1	CrN	0.198	0.191	-0.007
	TiN	0.133	0.176	0.043
	AlCrN	0.192	0.185	-0.007
X90CrMoV7-2	CrN	0.169	0.176	0.007
	TiN	0.153	0.181	0.028
	AlCrN	0.187	0.193	0.006
X140CrVW6-3-3	CrN	0.237	0.218	-0.019
	TiN	0.121	0.263	0.142
	AlCrN	0.162	0.139	-0.023

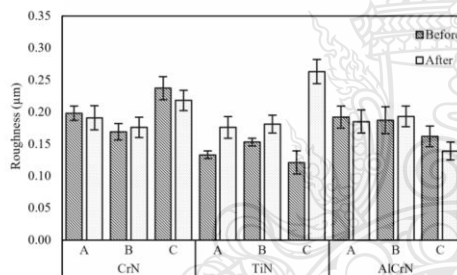


Fig. 3 Roughness test chromium nitride (CrN) Titanium nitride (TiN) and aluminum chromium nitride (AlCrN) of (A) X110CrMoV8-2-1, (B) X90CrMoV7-2 and (C) X140CrVW6-3-3

The experiment measured the surface roughness of CrN, TiN and AlCrN coatings on steel grades X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 and X140CrVW6-3-3 before and after stamping. The results revealed variations in roughness across coatings and substrates, highlighting the influence of both coating type and steel grade.

For CrN coatings, surface roughness on X110CrMoV8-2-1 decreased slightly from 0.198 μm to 0.191 μm after stamping, indicating minimal changes in surface conditions. On X90CrMoV7-2, there was a small increase from 0.169 μm to 0.176 μm , reflecting slight surface alterations. Conversely, on X140CrVW6-3-3, roughness decreased from 0.237 μm to 0.218 μm , suggesting improved smoothness during the stamping process.

For TiN coatings, X110CrMoV8-2-1 showed an increase in roughness from 0.133 μm to 0.176 μm , while X90CrMoV7-2 exhibited a similar increase from 0.153 μm to 0.181 μm . The largest increase occurred on

X140CrVW6-3-3, where roughness rose significantly from 0.121 μm to 0.263 μm . This suggests that TiN notably affects surface roughness, especially on X140CrVW6-3-3, possibly due to its harder yet less ductile nature.

For AlCrN coatings, X110CrMoV8-2-1 exhibited a reduction in roughness from 0.192 μm to 0.185 μm , while X90CrMoV7-2 showed a slight increase from 0.187 μm to 0.193 μm . On X140CrVW6-3-3, roughness decreased markedly from 0.162 μm to 0.139 μm , demonstrating that AlCrN provides enhanced smoothness after stamping, likely due to its excellent resistance to surface deformation.

Table 3 presents the surface roughness values before and after stamping, illustrating the variations in surface conditions caused by the process. Fig. 3 shows the roughness test results for CrN, TiN, and AlCrN coatings on (A) X110CrMoV8-2-1, (B) X90CrMoV7-2, and (C) X140CrVW6-3-3, highlighting these differences. The findings demonstrate that surface roughness is influenced by both coating type and substrate material. TiN generally caused the greatest increase in roughness, particularly on X140CrVW6-3-3, while AlCrN frequently reduced roughness, with the most significant reduction observed on X140CrVW6-3-3.

This aligns with Panjan's report that wear rates tend to increase with higher surface roughness. [12] Notably, the decreases in roughness for CrN on X110CrMoV8-2-1 and X140CrVW6-3-3, as well as AlCrN on X140CrVW6-3-3, indicate that the stamping process can smoothen certain coatings on specific steel grades, potentially enhancing surface quality and wear resistance.

C. Tool Life

The results revealed that AlCrN on X110CrMoV8-2-1 exhibited the longest tool life, enduring up to 447,379 coins, making it the best-performing coating in the experiment. The second-best performance was achieved by AlCrN on X140CrVW6-3-3, lasting 354,734 cycles. The third was TiN on X110CrMoV8-2-1, with a service life of 268,467 coins, as shown in Table 4 and Fig. 4.

From Fig. 5, it can be observed that the AlCrN coating on X110CrMoV8-2-1 steel exhibits the least amount of wear and achieves the longest service life. In contrast, when compared to the CrN coating on X140CrVW6-3-3 steel, the CrN coating shows extensive delamination which corresponds to the shortest service life.

TABLE 4. VALUE OF TOOL LIFE

Steel	Coating		
	CrN	TiN	AlCrN
K340	153,527	268,467	447,379
SL	186,229	222,777	296,679
K490	129,129	264,375	354,734

These findings demonstrate that the type of coating significantly impacts the durability of the die. AlCrN coatings proved to be the most durable, followed by TiN and CrN, respectively. The superior performance of AlCrN highlights its ability to withstand wear and maintain functionality under demanding conditions, making it an excellent choice for applications requiring extended tool life.

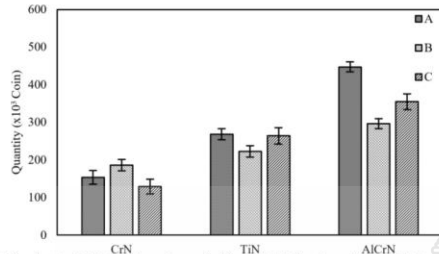


Fig. 4. Tool life for chromium nitride (CrN) Titanium nitride (TiN) and aluminum chromium nitride (AlCrN) of (A) X110CrMoV8-2-1, (B) X90CrMoV7-2 and (C) X140CrVW6-3-3

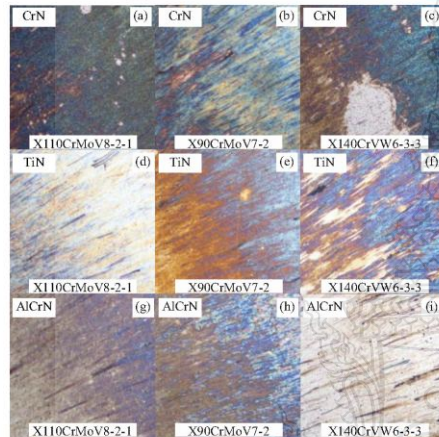


Fig. 5. The surface condition after use, showing wear and damage for a-c chromium nitride (CrN) d-f Titanium nitride (TiN) and g-i aluminum chromium nitride (AlCrN) of X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2 and X140CrVW6-3-3, respectively, in order from left to right.

AlCrN coatings enhance durability, reducing die replacements and downtime. For example, applying AlCrN on X110CrMoV8-2-1 increases coin production efficiency and minimizes material waste.

IV. CONCLUSIONS

This study evaluated the adhesion, surface roughness, and tool life of CrN, TiN, and AlCrN coatings applied on steel grades X110CrMoV8-2-1, X90CrMoV7-2, and X140CrVW6-3-3. All coatings demonstrated excellent adhesion (HF1) under the VDI 3198 standard. TiN and AlCrN showed no visible cracking or delamination, indicating superior adhesion performance, while CrN exhibited minor cracking around the indentation area, suggesting slightly lower resistance to mechanical stress.

Surface roughness measurements revealed distinct variations among the coatings. TiN caused the highest increase in roughness across all materials, reflecting its harder yet less ductile nature. AlCrN displayed a moderate increase in roughness and, in some cases, even reduced surface roughness after stamping, particularly on

X140CrVW6-3-3. Despite a relatively higher roughness value of 0.192 μm on X110CrMoV8-2-1, AlCrN achieved the longest tool life, demonstrating its ability to balance surface characteristics with exceptional wear resistance and durability.

In terms of tool life, AlCrN on X110CrMoV8-2-1 exhibited the best performance, enduring up to 447,379 coins. These results highlight the significant influence of coating type and substrate material on tool performance, with AlCrN emerging as the most durable solution due to its superior mechanical properties and adaptability under high-load conditions. This aligns with findings by Adesina [13], who reported that the inclusion of aluminum (Al) in ternary coatings enhances wear resistance, enabling AlCrN to outperform binary coatings like TiN and CrN, especially in demanding applications. These results underscore the potential of AlCrN to reduce operational costs and improve production efficiency, making it a reliable choice for extending the service life of tools and dies.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to Assoc. Prof. Dr. Natha Kuptasthien Appreciation and the manager of the Die-Making for her invaluable guidance and support throughout this research.

REFERENCES

- [1] S. Muangnil, "Inaugural Issue Volume 1," Available: <https://www.royalthaimint.net>
- [2] R. T. Mint. Current Circulating Coins of the Reign of King Rama X. Available: https://www.royalthaimint.net/ewtdadmin/ewt/mint_web/ewt_news.php?mid=784
- [3] B. Sresomroeng, P. Chumrum, and V. Premanond, "Residual Stress Measurement for Coated Film on Cold Work Tool Steel," *Advanced Materials Research*, vol. 299-300, pp. 1136-1141, 2011.
- [4] S. Gowthama, S. S. Bhattacharya, P. Venugopal, and R. Natarajan, "Coining Test for Evaluation of Tool Performance," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 64, no. 4-5, pp. 359-363, 2011.
- [5] Z. Keran, M. Math, M. Skunca, F. Barlat, Y. H. Moon, and M. G. Lee, "Coining as a microforming process," 2010.
- [6] Y. Bocharov, S. Kobayashi, and E. Thomsen, "The mechanics of the coining process," 1962.
- [7] D. Jakubčezová, D. Kalincová, and R. Kaštan, "Testing of PVD Hard Coatings Applied to Coining Dies," in *Materials Science Forum*, 2015, vol. 818, pp. 27-31: Trans Tech Publ.
- [8] M. Ťavodová, P. Beňo, J. Luptáková, D. Stančeková, N. Náprstková, and K. Monková, "Root cause analysis of coining tool failure with proposed solution to extend its service life," *Engineering Failure Analysis*, vol. 162, 2024.
- [9] J. L. Mo, M. H. Zhu, A. Leyland, and A. Matthews, "Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 215, pp. 170-177, 2013.
- [10] J. Mo, M. Zhu, B. Lei, Y. Leng, and N. Huang, "Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 1423-1429, 2007.
- [11] W. Onkratong, "Study of Tool Steels and Coating Materials on Stamping Dies of Two - Baht Coins."
- [12] P. Panjan, A. Dmóvšek, and J. Kovač, "Tribological aspects related to the morphology of PVD hard coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 343, pp. 138-147, 2018.
- [13] A. Y. Adesina, Z. M. Gasem, and A. S. Mohammed, "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*, vol. 44, no. 12, pp. 10355-10371, 2019.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายศุภกร แสงแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด 4 พฤษภาคม 2533
ที่อยู่ 46/16 หมู่ 16 ถนนพลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง
จังหวัดปทุมธานี 12120
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประสบการณ์ทำงาน นักวิชาการศึกษาแผนปฏิบัติการ
กองกษาปณ์ กรมธนารักษ์ กระทรวงการคลัง
พ.ศ.2563 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 09-2438-5353
อีเมล suppakorn.rtm@gmail.com

