

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบนิเกิลร่วมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วย
วิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบร่วมบนผิวชิ้นงานพิมพ์สามมิติเอบีเอสเพื่อความ
ต้านทานการสึกหรอ

Optimization of Nickel with Molybdenum Disulfide Powder Co-electrodeposition
on 3D-printed ABS Part for Wear Resistance

ธนกฤต โชติภาวาริศ* และ ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร

แขนงวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

E-mail: thanakrit.cho@stou.ac.th*

Thanakrit Chotibhawaris* and Srisit Chianrabutra

Field of Industrial Technology, School of Science and Technology,

Sukhothai Thammathirat Open University, Pak Kred, Nonthaburi, 11120

E-mail: thanakrit.cho@stou.ac.th*

Received 3 Aug 2025; Revised 16 Aug 2025

Accepted 20 Dec 2025; Available online 30 Dec 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ในการเคลือบนิเกิลที่มีส่วนผสมของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็งด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบร่วม บนผิวชิ้นงานพิมพ์สามมิติเอบีเอสเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอ โดยนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Ball-On-Disc และหาสภาวะเหมาะสมที่สุดด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี 2^k แฟคทอเรียล พบว่าความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบดังกล่าว โดยปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบดังกล่าวต่ำเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงในการเคลือบผิว เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงส่งผลให้ชั้นเคลือบดังกล่าวที่มีกลุ่มก้อนโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์กับนิเกิลขนาดใหญ่ สามารถต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นเคลือบที่สัมผัสกับหัวกดของเครื่อง Ball-On-Disc เกิดขึ้นน้อย ซึ่งการเคลือบผิวที่ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง 10 A/dm² ส่งผลทำให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นเคลือบต่ำที่สุด

คำหลัก: โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ MoS₂ วิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การสึกหรอ ชิ้นเคลือบ

Abstract

This study investigated the optimal conditions for improving the wear resistance of 3D-printed ABS parts through nickel electroplating with molybdenum disulfide (MoS_2) as a solid lubricant. The key parameters examined were the concentration of MoS_2 powder in the plating bath and the applied current density during co-electrodeposition. A Ball-on-Disc test was conducted to evaluate wear performance. Based on the results from a 2^k factorial design, current density was identified as the statistically significant factor influencing wear loss, whereas the MoS_2 powder concentration showed no significant effect. High current density during electrodeposition promoted the formation of large nodules in the Ni- MoS_2 coating, thereby enhancing the wear resistance of the plated surface against an alumina ball. The optimal condition for minimizing wear loss, as determined from Pin-on-Disc testing, was achieved with a current density of 10 A/dm^2 .

Keywords: molybdenum disulfide, MoS_2 , electroplating, wear, coating

บทนำ

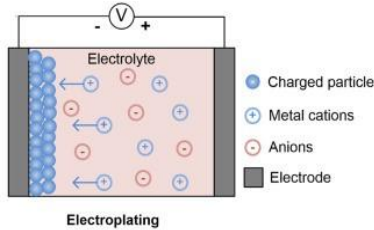
กระบวนการผลิตด้วยวิธีเพิ่มเนื้อวัสดุหรือการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) มีบทบาทสำคัญในการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและต้องการความรวดเร็วโดยใช้งานแพร่หลายกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์ประเภทเอบีเอส (Acrylonitrile Butadiene Styrene; ABS) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยพฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานที่ผลิตจากวัสดุดังกล่าวมีความสำคัญต่อความทนทานและความน่าเชื่อถือต่อการใช้งาน [1, 2] ชิ้นงานดังกล่าวจึงควรมีสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอสูง แต่วัสดุประเภทพอลิเมอร์มีข้อจำกัดด้านความต้านทานการสึกหรอ จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความต้านทานการสึกหรอ เช่น วัสดุประเภทโลหะในการเคลือบผิวเพื่อพัฒนาสมบัติดังกล่าว ซึ่งต้นทุนต่ำกว่าการพิมพ์สามมิติชิ้นงานโลหะซึ่งมีราคาสูง อีกทั้งวัสดุและกระบวนการดำเนินการหลังการผลิตมีค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วย โดยกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง เช่น แกรไฟต์ หรือ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์บนผิวชิ้นงานดังกล่าวเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการเพิ่มสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานพิมพ์สามมิติเอบีเอสด้วยสารหล่อลื่นของแข็งมาปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน โดยทำการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ในการเคลือบนิเกิลที่มีส่วนผสมของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบร่วม (Co-electrodeposition) โดยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นที่มีสถานะเป็นของแข็งจึงสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานการสึกหรอให้กับผิวชิ้นงานเอบีเอส ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมของปัจจัยดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนชิ้นงานเอบีเอส

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรรมวิธีการเคลือบผิวภายนอกของพลาสติกด้วยวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ ซึ่งนิยมแพร่หลายในวัสดุพอลิเมอร์ของเอบีเอส [3] สามารถทำได้ทั้งในลักษณะที่ใช้กระแสไฟฟ้า และไม่ใช้กระแสไฟฟ้า เข้ามาเกี่ยวข้อง ในส่วนของกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำในระบบซึ่งประกอบด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าบวก และลบโดยขั้วลบคือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวที่ไอออนบวกของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมารับอิเล็กตรอนเกิดเป็นชั้นเคลือบของโลหะบนผิวชิ้นงาน [4]



รูปที่ 1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า [5]

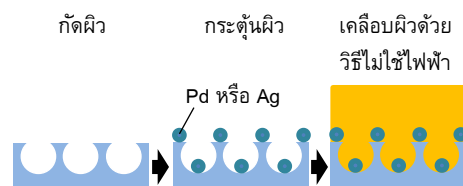
วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเคลือบ นิกเกิลร่วมกับโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์บนผิวชิ้นงาน พิมพ์สามมิติเอปียเอสด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบ ร่วม โดยมีโครงสร้างของชั้นเคลือบดังแสดงในรูปที่ 2 [6]



รูปที่ 2 โครงสร้างของชั้นเคลือบนิกเกิลร่วมกับโมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ [6]

ซึ่งจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมผิว (Surface Pretreatment) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้โดย การกัดทางเคมี (Chemical Etching) ให้ผิวชิ้นงานมีความ หยาบและรูพรุนขนาดเล็กเพื่อให้ชั้นเคลือบยึดเกาะ ผิวชิ้นงาน (Adhesion) ได้ยิ่งขึ้น รวมถึงทำให้ ผิวชิ้นงานสัมผัสกับน้ำหรือสารละลายได้ดี (Hydrophilic Surface) จากนั้นทำการกระตุ้น ผิวชิ้นงานดังกล่าวให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเพื่อให้ ไอออนของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาจาก อิเล็กตรอนเกิดเป็นชั้นเคลือบได้ แล้วจึงนำไปเคลือบ ผิวด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ นิกเกิลผสมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ซึ่งผงดังกล่าว จะแขวนลอยอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อจ่าย กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานซึ่งนำไฟฟ้า ไอออนของนิกเกิลจะถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า ไปปรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นชั้นเคลือบบนชิ้นงานโดย นำพาผงของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เข้าไปอยู่ในชั้นผิว ดังกล่าวด้วย [7] ในการเตรียมผิวชิ้นงานเอปียเอสจะใช้ กรดโครมิกในการกัดผิวโดยส่วนที่เป็น Butadiene ของเอปียเอสจะถูกกัดเป็นรูมีขนาดระดับนาโนเมตรถึง

ไมครอน จากนั้นจึงกระตุ้นผิวด้วยพลาสมาเตียมหรือเงิน แล้วจึงทำการเคลือบผิวด้วยวิธีไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Plating) เช่น ทองแดง หรือ นิกเกิล เพื่อให้พื้นผิวมีความนำไฟฟ้าที่ดีต่อการนำไฟฟ้า เคลือบด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าต่อไป ซึ่งข้อดีของ วิธีนี้คือพื้นผิวเอปียเอสจะมีลักษณะรูพรุนที่ยึดเกาะได้ดี เป็นปรากฏการณ์ “Anchoring Effect” เนื่องจากด้าน ใต้ผิวชิ้นงานเป็นโพรงที่ใหญ่กว่าบนผิวชิ้นงาน ดัง รูปที่ 3



รูปที่ 3 การเตรียมผิวชิ้นงานเอปียเอส [3]

เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าบนผิวชิ้นงานเอ ปียเอสที่ผ่านการเตรียมผิวแล้วชั้นเคลือบที่ได้จะมี สมบัติด้านความแข็งและความต้านทานการสึกหรอซึ่ง ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์กับ นิกเกิล [8] และลักษณะทางกายภาพรูปร่างของชั้น เคลือบ เช่น โครงสร้างผลึก ความหยาบผิว และความ แข็งของชั้นเคลือบดังกล่าว ทั้งนี้ปริมาณของผงโม ลิบดีนัมไดซัลไฟด์ที่เหมาะสมจะทำให้ชั้นเคลือบมี ความแข็งแรง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และการสึก หรอต่ำ ช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานและลดการ ชำรุดเสียหาย โดยลักษณะทางกายภาพและสมบัติของ ชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานดังกล่าวขึ้นอยู่กับตัวแปร ความคุมของกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เช่น ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ แรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิของกระบวนการ มี การศึกษาถึงปัจจัยการเคลือบนิกเกิลร่วมกับผง โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าโดย Gulur E. (2013) [9] ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิล ร่วมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วย ไฟฟ้าบนชิ้นงานสแตนเลสเพื่อให้ความทนในชั้น เคลือบและสึกหรอต่ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการ

เคลือบ ได้แก่ ความเข้มข้นและขนาดผงของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เท่ากับ 30 g/L และ 1.44 μm ตามลำดับ ความเข้มข้น Sodiumlignosulfonate เท่ากับ 1 g/L อุณหภูมิการเคลือบเท่ากับ 50°C ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าเท่ากับ 4.8 A/dm² จากงานวิจัยของ Losiewicz B. และคณะ (2015) [7] ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิลร่วมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S235 เพื่อให้ได้ปริมาณผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบมากที่สุดสำหรับเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน พบว่าใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าเท่ากับ 25 A/cm² อุณหภูมิการเคลือบเท่ากับ 30°C โดยใช้ความเข้มข้นและขนาดของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เท่ากับ 10 g/L และน้อยกว่า 2 μm ตามลำดับ นอกจากนี้งานวิจัยของ Trabelsi D. (2018) [10] ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิลร่วมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild Steel) เพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและสึกหรอต่ำ พบว่าความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เท่ากับ 0.5 g/L ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้มีปริมาณผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์โดยน้ำหนักในชั้นเคลือบร้อยละ 39 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและสึกหรอต่ำที่สุด

อย่างไรก็ดี ยังไม่มีการศึกษาถึงการเคลือบนิกเกิลร่วมกับผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์บนชิ้นงานเอบีเอสรวมถึงการศึกษาสมบัติด้านความทนทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานดังกล่าว องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสและเสียดสี โดยสามารถใช้วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเอบีเอสผ่านการเคลือบผิวดังกล่าวทดแทนการใช้โลหะหรือเซรามิกส์และเป็นชิ้นงานที่สามารถหล่อขึ้นได้เอง (Self-lubricating)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเอบีเอส ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นพอลิเมอร์เอบีเอสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

1.75 mm อุณหภูมิขณะพิมพ์ 200°C ความเร็ว 60 mm/s พิมพ์เป็นรูปร่างแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความหนา 1 cm แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 และเชื่อมต่อกับสายไฟด้วยกาวเงิน ดังรูปที่ 4 ก)



ก)



ข)

รูปที่ 4 ก) ชิ้นงานพอลิเมอร์ประเภทเอบีเอสขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ข) ชิ้นงานภายหลังการกัดกรด กระตุ้นผิว และเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

3.2 การกัดกรดและกระตุ้นผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานจุ่มในสารละลายที่ผสมจากสารละลาย CrO₃ ความเข้มข้น 420 g/l กับ H₂SO₄ (sg. 1.84) 98%w/w ปริมาณ 380 cc ต่อสารละลายทั้งหมด 1,000 cc เป็นเวลาประมาณ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 65°C จากนั้นทำการกระตุ้นผิวครั้งที่ 1 เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดจุ่มในสารละลายที่ผสมจากสารละลาย SnCl₂·2H₂O ความเข้มข้น 10 g/l กับ HCl (s.g. 1.18) 35.4 % w/w ปริมาณ 40 cc ต่อสารละลายทั้งหมด 1,000 cc เป็นเวลาประมาณ 3 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C

ทำการกระตุ้นผิวครั้งที่ 2 โดยใช้สารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ 1. สารละลาย AgNO₃ ความเข้มข้น 50 g/l ผสมกับแอมโมเนียโดยผสมแอมโมเนียจนสารละลายมีความใส 2. สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.4 g/cc แล้วนำสารละลายทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันโดยใช้สารละลายชนิดที่ 1 กับชนิดที่ 2 เป็นสัดส่วน 3 ต่อ 1 แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการกระตุ้นผิวครั้งที่ 1 มาจุ่มในสารละลายนี้เป็นเวลาประมาณ 3 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C

3.3 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยวิธีไม่ใช้ไฟฟ้า

นำชิ้นงานที่ผ่านการกระตุ้นผิวครั้งที่ 2 แล้วมาเคลือบทองแดงด้วยวิธีไม่ใช้ไฟฟ้าโดยจุ่มชิ้นงาน

ดังกล่าวในสารละลายที่ผสมจาก CuSO_4 ปริมาณ 7 g NaOH ปริมาณ 7 g โปตัสเซียมโซเดียมตาเตรท 40 g ฟอสฟาติไฮด์ (37%) 30 cc โดยผสมสารทั้งหมดนี้ ในน้ำกลั่น 1,000 cc แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการกระตุ้นผิวครั้งที่ 2 แล้วมาจุ่มในสารละลายดังกล่าวนี้เป็นเวลา ประมาณ 15 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C จะได้ชั้นทองแดง เคลือบบนผิวชิ้นงานดังรูปที่ 4 ข)

3.4 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

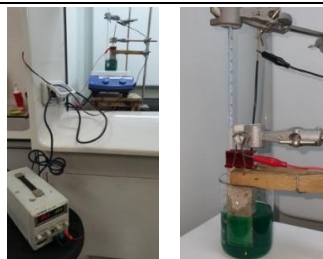
ใช้สารละลายที่ผสมจาก NiSO_4 ปริมาณ 250 g NiCl_2 ปริมาณ 60 g B(OH)_3 ปริมาณ 45 g และซัคคาริน (Saccharine) 4 g ในน้ำกลั่น 1,000 cc และทำการเคลือบชิ้นงานด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55°C ใช้เวลาในการเคลือบผิว 1 ชั่วโมง โดยใส่ผง MoS_2 ลงในสารละลายดังกล่าวเพื่อให้เกิดการเคลือบผิวด้วย นิกเกิลและผง MoS_2 บนผิวชิ้นงาน ทำการปรับค่า ปริมาณผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าที่มีงานวิจัยน้อยตามค่าที่กำหนดในตารางที่ 1 และทำการกววนด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ด้วยแท่งแม่เหล็กและเครื่องกววนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) โดยผง MoS_2 มีขนาดอนุภาค $3\ \mu\text{m}$ ที่ปริมาณ ร้อยละ 99

ตารางที่ 1 ค่าปริมาณผง MoS_2 และค่ากระแสไฟฟ้า

ปัจจัย ปริมาณ

ปัจจัย	ปริมาณ			
ความเข้มข้นผงโมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ (g/l)	6	8	10	12
ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/dm^2)	4	6	8	10

ชิ้นงานต่อกับขั้วคาโทดของเครื่องจ่าย กระแสไฟฟ้าส่วนขั้วแอโนดต่อกับแท่งนิกเกิลบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 5



(ก)

(ข)

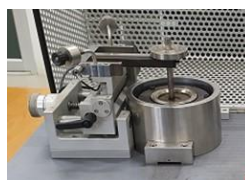
รูปที่ 5 (ก) การต่อชิ้นงานกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (ข) การต่อขั้วคาโทดและขั้วแอโนด

3.5 การทดสอบการสึกหรอ

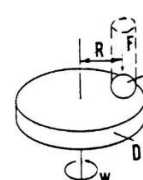
ชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจะถูกนำไป ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Ball-On-Disc ตามมาตรฐานการทดสอบการสึกหรอ ASTM G99-95a [10] ดังรูปที่ 6 โดยใช้ภาระแรงกด (F) 5 N ความเร็ว 25 cm/s ระยะทาง 200 m ระยะรัศมีการทดสอบการ สึกหรอบนผิวชิ้นงาน (Wear Track Radius, R) 4 mm และใช้ลูกบอลอะลูมินา (Al_2O_3) รัศมี (r) 3 mm เป็นตัวกดบนชิ้นเคลือบของชิ้นงาน โดยนำค่าเหล่านี้ มาคำนวณหาค่าปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบดัง สมการที่ (1)

$$V = \frac{\pi R d^3}{6r} \quad (1)$$

โดย V คือ ปริมาณการสึกหรอ d คือ ความกว้าง รอยสึกหรอวัดจากเครื่อง Profilometer R คือ ระยะ รัศมีการทดสอบการสึกหรอบนผิวชิ้นงาน r คือ รัศมี ลูกบอลที่ใช้ทดสอบ



(ก)

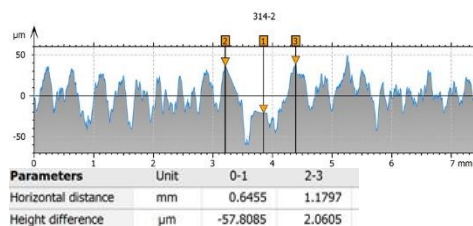


(ข)

รูปที่ 6 (ก) เครื่องทดสอบการสึกหรอ Ball-On-Disc (ข) การสัมผัสของลูกบอลและชิ้นงานระหว่างการทดสอบ [10]

4. ผลการวิจัย

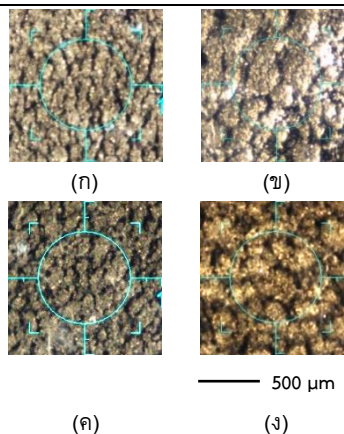
ค่าที่ได้จากการวัดค่าส่วนผสมทางเคมีจากเครื่อง X-ray Fluorescence ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากเครื่อง Pin-On-Disc รวมถึงค่าความหยาบผิว ความกว้างของรอยสึกซึ่งวัดจากเครื่อง Profilometer ดังรูปที่ 7 จากการวัด 3 ค่ามาคำนวณตามสมการที่ (1) เป็นค่าปริมาณการสึกหรอ บันทึกในตารางที่ 2 ลักษณะผิวเคลือบที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าพื้นผิวชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้ามีลักษณะเป็นก้อนหรือ Nodule เกาะติดกันทั่วพื้นผิวชั้นเคลือบ โดยขนาดของก้อนดังกล่าวโตขึ้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ตัวอย่างการวัดความกว้างของรอยสึกด้วยเครื่อง Profilometer ชั้นเคลือบจากความเข้มข้นผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ 10 g/l และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4 A/dm²

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

ความเข้มข้น MoS ₂ (g/l)	ความหนาแน่นกระแส (A/dm ²)	ค่าเฉลี่ยสัดส่วน MoS ₂ กับนิกเกิลในชั้นเคลือบ (%MoS ₂ /%Ni)	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ)	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (R _a) (μm)	ปริมาณการสึกหรอ (mm ³) [ความกว้างรอยสึกหรอ (mm)]		
					1	2	3
6	4	5.3/94.7	0.546	14.90	1.63 [1.67]	4.66 [2.37]	6.85 [2.69]
	6	3.3/96.7	0.543	6.96	0.61 [1.21]	0.73 [1.28]	0.22 [0.86]
	8	9.5/90.5	0.541	11.25	5.29 [2.48]	0.70 [1.26]	2.43 [1.91]
	10	15.1/84.9	0.491	14.34	0.44 [1.08]	0.94 [1.39]	0.79 [1.32]
8	4	14.6/85.4	0.376	10.58	7.25 [2.75]	5.19 [2.46]	5.17 [2.46]
	6	16.3/83.7	0.667	8.14	1.75 [1.71]	0.87 [1.36]	0.78 [1.31]
	8	10.4/89.6	0.571	8.49	1.43 [1.60]	1.20 [1.51]	0.53 [1.15]
	10	12.8/87.2	0.586	8.78	0.35 [1.00]	0.64 [1.23]	0.72 [1.27]
10	4	14.3/85.7	0.427	7.54	1.46 [1.61]	0.57 [1.18]	3.24 [2.10]
	6	10.8/89.2	0.453	6.98	0.44 [1.08]	1.44 [1.60]	0.56 [1.17]
	8	17.1/82.9	0.607	6.91	0.48 [1.11]	0.85 [1.35]	1.66 [1.68]
	10	11.0/89.0	0.496	5.17	0.59 [1.19]	1.54 [1.64]	0.36 [1.01]
12	4	8.7/91.3	0.326	12.15	1.94 [1.77]	1.64 [1.67]	1.93 [1.77]
	6	12.5/87.5	0.501	9.53	1.32 [1.56]	2.38 [1.90]	1.22 [1.52]
	8	11.1/88.9	0.624	6.52	0.37 [1.02]	2.27 [1.87]	0.35 [1.00]
	10	17.8/82.2	0.579	10.78	1.47 [1.60]	0.37 [1.02]	0.54 [1.16]



รูปที่ 8 ลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบตามความเข้มข้นผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

(ก) 6 g/l, 4 A/dm² (ข) 6 g/l, 10 A/dm²
(ค) 12 g/l, 4 A/dm² (ง) 12 g/l, 10 A/dm²

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำสุด

ทำการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของชิ้นเคลือบด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial) จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำสุดด้วยวิธี 2^k แฟคทอเรียล (2^k Factorial) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DoE) ที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลายๆ ตัว (k ปัจจัย) ต่อตัวแปรตาม ในที่นี้มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab version 19 จากตารางที่ 2 พิจารณว่าปัจจัยด้านความเข้มข้นของ MoS_2 ในสารละลาย ปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และปัจจัยจากอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังรูปที่ 9 พบว่า

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	100.57	6.705	5.57	0.000
Linear	6	65.13	10.856	9.02	0.000
MoS2	3	10.55	3.516	2.92	0.049
Current	3	54.59	18.195	15.11	0.000
2-Way Interactions	9	35.44	3.938	3.27	0.006
MoS2*Current	9	35.44	3.938	3.27	0.006
Error	32	38.53	1.204		
Total	47	139.10			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.09728	72.30%	59.32%	37.68%

รูปที่ 9 การพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบ โดยกำหนดค่า α (ความผิดพลาดที่ยอมรับได้) เท่ากับ 0.05

ทุกปัจจัยดังกล่าวนี้ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบ เนื่องจากค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญหรือค่า α เท่ากับ 0.05 ถึงแม้ว่าปัจจัยด้าน

ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายจะมีค่า P-Value ใกล้เคียงกับค่า α มากก็ตาม แต่เนื่องจากปัจจัยจากอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (" MoS_2 *Current") มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า α ดังนั้นปัจจัยด้านความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายจึงยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบเช่นกันกับปัจจัยอื่นตามหลักการลำดับชั้น (Hierarchical Principle) [11] ดังนั้นปัจจัยทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้หาค่าของสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำสุดต่อไป โดยนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยรวมถึงปริมาณการสึกหรอจากตารางที่ 2 คือ ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย (g/l) ได้แก่ 6 กับ 12 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/dm^2) ได้แก่ 4 กับ 10 มาเป็นระดับของปัจจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยที่มีต่อปริมาณการสึกหรอในรูปของสมการคณิตศาสตร์หรือสมการการถดถอย (Regression) โดยดำเนินการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ดังรูปที่ 10 พบว่าค่า P-Value ของปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ("Current") ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายถึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคืออิทธิพลของปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อปริมาณการสึกหรอของชิ้นเคลือบอย่างมีนัยสำคัญ

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	26.278	8.759	4.79	0.034
Linear	2	21.156	10.578	5.78	0.028
MoS2	1	4.588	4.588	2.51	0.152
Current	1	16.567	16.567	9.06	0.017
2-Way Interactions	1	5.122	5.122	2.80	0.133
MoS2*Current	1	5.122	5.122	2.80	0.133
Error	8	14.633	1.829		
Total	11	40.910			

รูปที่ 10 การพิจารณาระดับของปัจจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยที่มีต่อปริมาณการสึกหรอในรูปของสมการการถดถอย ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดค่า α (ความผิดพลาดที่ยอมรับได้) เท่ากับ 0.05

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยอีกครั้งหนึ่งโดยพิจารณาเพียงปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 11 ได้ผลการถดถอยดังสมการที่ (2) โดยค่า Lack-of-Fit มีค่า P-Value มากกว่าค่า α นั่นคือ

$$\text{ปริมาณการสึกหรอ (Volume Loss)} = 4.67 - 0.392 \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current)} \quad (2)$$

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Linear	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Current	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Error	10	24.343	2.434		
Lack-of-Fit	2	9.710	4.855	2.65	0.131
Pure Error	8	14.633	1.829		
Total	11	40.910			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Volume loss} = 4.67 - 0.392 \text{ Current}$$

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Current	10			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Volume loss	0.758	0.637	(-0.661, 2.178)	(-2.997, 4.513)

รูปที่ 11 พิจารณาผลของปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณการสึกหรอต่ำสุดของชั้นเคลือบ

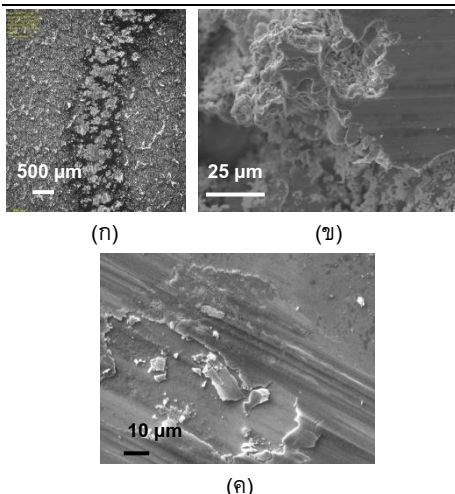
จากสมการที่ (2) ปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบจะมีค่าต่ำสุดเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 A/dm² จะทำให้ชั้นเคลือบมีปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดคือ 0.76 mm³ นั่นคือสภาวะเหมาะสมที่สุดคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดซึ่งทำให้ปริมาณการสึกหรอชั้นเคลือบต่ำที่สุดนั่นเอง

5.2 กลไกการสึกหรอ

ลักษณะผิวชั้นเคลือบจากรูปที่ 12 (ก) พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่คือการรวมตัวของอนุภาคโพลีไดเมทิลไซไนด์กับนิกเกิล (พื้นที่สีดำ) ซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Nodules) รวมตัวกัน โดยมีบริเวณที่เป็นนิกเกิล (พื้นที่สีขาว) แทรกตัวอยู่เป็นพื้นที่แคบ ๆ เพียง

เล็กน้อยซึ่งอยู่ต่ำกว่าพื้นที่สีดำกระจายตัวบนชั้นเคลือบ นั่นคือ อนุภาคของโพลีไดเมทิลไซไนด์ปกคลุมพื้นผิวส่วนใหญ่ของชิ้นงานโดยมีนิกเกิลเป็นตัวประสานและทำหน้าที่รับการสัมผัสในขณะการเสียดสีได้โดยตรง

โดยทั่วไปส่วนผสมทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบมีผลต่อการต้านทานการสึกหรอ [12, 13] สำหรับผิวเคลือบนิกเกิลผสมผงโพลีไดเมทิลไซไนด์ ซึ่งผงโพลีไดเมทิลไซไนด์เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ดังนั้นหากมีปริมาณโพลีไดเมทิลไซไนด์ในชั้นเคลือบดังกล่าวมากจะยิ่งช่วยให้การสึกหรอน้อยลง [11, 14] อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบด้วยวิธีแฟคทอเรียลในหัวข้อที่ 5.1 ปริมาณการสึกหรอไม่มีความสัมพันธ์กับส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบ ในขณะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อปริมาณการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 8 แสดงถึงของกลุ่มก้อนโพลีไดเมทิลไซไนด์กับนิกเกิลมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจนตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะทำให้กลุ่มก้อนดังกล่าวก่อตัวและเติบโตอย่างรวดเร็วและมีขนาดใหญ่ซึ่งเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ นอกจากนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายังส่งผลต่อความหนาแน่นของชั้นเคลือบซึ่งมีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก (Matrix) ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงส่งผลให้นิกเกิลในชั้นเคลือบมีความหนาแน่นสูงส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้น [15]



รูปที่ 12 ตัวอย่างภาพการทดสอบด้วยวิธี Ball-On-Disk ของชั้นเคลือบที่ได้จาก ค่าความเข้มข้นผงโพลีไธมไดซัลไฟด์ในสารละลายสูงสุด (12 g/l) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (10 A/dm²) (ก) รอยสึกหรอจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) การขีด และ (ค) การหลุดลอกเป็นชั้นภายในรอยสึกหรอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อผิวชั้นเคลือบเสียดสีกับลูกบอลอะลูมินาทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) ผิวที่เห็นมีลักษณะเป็นร่องขนาน (Scratch Grooves) ดังรูปที่ 12 (ข) บ่งบอกถึงการเสีรูปของกลุ่ก่อนโพลีไธมไดซัลไฟด์กับนิกเกิลเมื่อถูกขัดถูด้วยลูกบอลอะลูมินาซึ่งมีความแข็งสูงกว่าและความหยาบผิวต่ำกว่า (0.01-0.03 μm Ra [16]) นอกจากนี้ยังเกิดกลไกการสึกหรอแบบหลุดลอกเป็นชั้น (Delamination) ตรงบริเวณที่ผิวดูเป็นแผ่นบางหลุดออก แสดงถึงการแตกตัวของชั้นใต้ผิวในระหว่างการเสียดสีซ้ำ ๆ ดังรูปที่ 12 (ค) กลไกนี้เป็นผลต่อเนื่องจากการเกิดความเค้นเนื่องและการสะสมความเสียหายแบบความล้าใต้ผิว การล้าภายใน (Subsurface Fatigue) [17]

6. สรุป

จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีทางสถิติ 2^k แฟคทอเรียล พบว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยทำให้ปริมาณ

การสึกหรอของชั้นเคลือบต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุด คือ 10 A/dm² จะทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดเท่ากับ 0.76 mm³ ตามสมการการถดถอยที่ได้จากวิธีดังกล่าว ความเข้มข้นของผงโพลีไธมไดซัลไฟด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลต่อการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถเลือกใช้ความเข้มข้นของผงโพลีไธมไดซัลไฟด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าต่ำสุด (6 g/l) ได้ เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในการเคลือบผิว โดยชั้นเคลือบที่มีกลุ่มก่อนโพลีไธมไดซัลไฟด์กับนิกเกิลขนาดใหญ่จะมีปริมาณการสึกหรอน้อย ซึ่งปัจจัยการเคลือบที่ส่งผลดังกล่าวคือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยมีกลไกการสึกหรอแบบขัดถูและแบบหลุดลอกเป็นชั้นอันเนื่องมาจากการล้าตัวของชั้นเคลือบ

การวิจัยขั้นต่อไปควรศึกษาถึงผลของสมบัติด้านความแข็งของชั้นเคลือบที่มีผลต่อการสึกหรอเนื่องจากความแข็งเป็นอีกหนึ่งสมบัติที่มีผลต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการวัดค่าความแข็งขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบและความแข็งของชิ้นงาน ซึ่งต้องเลือกวิธีการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบให้เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ชิ้นงานเป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเอป็อกซี ซึ่งมีความแข็งต่ำมากเมื่อเทียบกับผิวเคลือบซึ่งเป็นโลหะนิกเกิลผสมอนุภาคโพลีไธมไดซัลไฟด์ซึ่งมีความแข็งสูง การวัดความแข็งของชั้นเคลือบดังกล่าวต้องไม่เกิดการยุบตัวของชิ้นงานและรอยกดไม่เกิดการทะลุชั้นเคลือบเพื่อให้ได้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบอย่างแท้จริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิดา สุนาภิรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่แก้ไขปัญหาให้ทุกเรื่อง คุณปัทมนันท์ อักษร และคุณสมพล เพ็ญระน้อย สำหรับการช่วยเหลือทั้งในหน้าที่และนอกเหนือหน้าที่ของตนเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Amrishraj D, Senthilvelan T. Dry Sliding wear behavior of ABS Composites reinforced with nano Zirconia and PTFE. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 5(2): 7068-7077.
- [2] Mohamed A, Masood H, Bhowmik L. Analysis of wear behavior of additively manufactured PC-ABS parts. *Materials Letters*. 2018; 230: 261-265.
- [3] Olivera S, Muralidhara B, Venkatesh K, Gopalakrishna K, Vivek S. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of Materials Science*. 2016; 51(8): 3657-3674.
- [4] Mangalaraj D, Poongodi S. Electrodeposition—A Simple and Effective Method for the Preparation of Metal Oxide Nanostructured Thin Films. In Ebenezar J, editor. *ICRTMSA 2016. Proceeding of the International Conference on Recent Trends in Materials Science and Applications*; 2016 February 29; Tiruchirappalli, South India. 2016. p. 49-60.
- [5] Dahman Y. *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures*. Canada: Elsevier; 2017.
- [6] Wang Z, et al. Addition of molybdenum disulfide solid lubricant to WC-12Ni thermal spray cemented carbide powders through electroless Ni-MoS₂ co-deposition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019; 786: 594-606.
- [7] Losiewicz B, Dercz G, Popczyk M. Electrodeposition of the Ni+MoS₂ Composite Electrocatalysts. *Solid State Phenomena*. 2015; 228: 125-131.
- [8] Trabelsi D, Zouari M, Kharrat M, Dammak M, Eyraud M, Vacandio F. Type and concentration effects of particulate solid lubricants on the microstructure, friction, and wear of electrodeposited Ni composite coatings. *Journal of Engineering Tribology*. 2018; 233(6): 965-974.
- [9] GÜLER S. *Electrodeposition of Molybdenum Disulfide Particles in Nickel Matrix [A Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy]*. Ankara; Middle East Technical University; 2013.
- [10] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, in G 99-95a. 2000.
- [11] Montgomery D. *Design and Analysis of Experiments*. U.S.A.: Wiley; 2012.
- [12] Stachowiak W, Batchelor W. *Engineering Tribology*. U.S.A.: Butterworth-Heinemann; 2005.
- [13] Ashutosh A, Ahn B. Effect of Plating Current Density on the Ball-On-Disc Wear of Sn-Plated Ni Coatings on Cu Foils. *Coatings*. 2021; 11(56): 12.
- [14] He Y. *Electrodeposition of nickel-based composite coatings for tribological applications [A Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy]*. Southampton; The University of Southampton; 2015.
- [15] Boukhouiete A, Boumendjel S, Sobhi N-E-H. Effect of current density on the microstructure and morphology of the electrodeposited nickel coatings. *Turkish Journal of Chemistry*. 2021; 45(5): 1599-1608.

- [16] Piconi C, Labanti M, Magnani G, Caporale M, Maccauro G, Magliocchetti G. Analysis of a failed alumina THR ball head. *Biomaterials*. 1999; 20: 1637-1646.
- [17] Yutao Y, Lifeng L, Zhao Y. Characterization and Wear Behaviors of Electrodeposited Ni-MoS₂/SiC Composite Coating. *Coating*. 2022; 12(8): 1223.