



ภาวะการเปียกของพื้นผิวแผ่นโลหะเจือเงินเคลือบไทเทเนียมที่ถูกเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟริติกเดปโพลิซัน

Surface Wettability of Graphene Oxide/Silver Nanocomposite (GO/AgNP) Coated Nickel-Titanium (NiTi) Alloys by Electrophoretic Deposition

สิรภัทร พิพัฒน์ฉัตร* พนิดา ธัญญศรีสังข์ และ วิริทธิ์พล ศรีมณีพงษ์

Sirapat Pipattanachat*, Panida Thanyasrisung and Viritpon Srimaneepong

ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Department of Microbiology, Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

*Corresponding author, E-mail: Toniez_dentit@hotmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อเปรียบเทียบภาวะการเปียกของพื้นผิวจากค่ามุมสัมผัสพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เคลือบอยู่บนโลหะเจือเงินเคลือบไทเทเนียม ด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟริติกเดปโพลิซันที่เวลาที่แตกต่างกัน โดยนำชิ้นโลหะเจือเงินเคลือบไทเทเนียมขนาด 6 x 6 x 1 มิลลิเมตร มาขัดและเตรียมพื้นผิวก่อนนำไปเคลือบพื้นผิวทั้งหมดจำนวน 15 ชิ้น แบ่งกลุ่มการทดลอง เป็นจำนวน 3 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ชิ้น ได้แก่ กลุ่มที่ไม่ผ่านการเคลือบพื้นผิว (UC) กลุ่มที่เคลือบพื้นผิวเป็นระยะเวลา 1 นาที (C1) และกลุ่มที่เคลือบพื้นผิวเป็นระยะเวลา 5 นาที (C5) นำชิ้นงานไปเคลือบพื้นผิวด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟริติกเดปโพลิซันเป็นเวลา 1 และ 5 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาศึกษาลักษณะของผิวหน้าชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแล้วนำมาศึกษาภาวะการเปียกของพื้นผิวจากวัดและบันทึกค่ามุมสัมผัสพื้นผิวทั้งหมด 5 ตำแหน่งในหนึ่งชิ้นงานด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสพื้นผิวความละเอียดสูง จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสต่อหนึ่งชิ้นงาน แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยนี้ไปวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากผลการศึกษาพบว่า กลุ่มการทดลองที่ไม่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมีค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสสูงสุดที่สุด (78.3 ± 5.5 องศา) รองลงมาคือกลุ่มการทดลองที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 5 นาที (72.2 ± 5.2 องศา) และกลุ่มการทดลองที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 1 นาที เป็นกลุ่มที่มีค่ามุมสัมผัสพื้นผิวดำที่สุด (70.6 ± 2.5 องศา) อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ระหว่างทั้ง 3 กลุ่มนี้ ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า กราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต



ที่เคลือบอยู่บน โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟรีตติคเคลปโพลีซันในระยะเวลาที่แตกต่างกันไม่มีผลทำให้
ภาวะการเปียกของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป

คำสำคัญ: กราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม อิเล็กโทรโฟรีตติคเคลปโพลีซัน ภาวะการเปียกของพื้นผิว
ค่ามุมสัมผัสพื้นผิว

Abstract

This study aimed to compare the surface wettability of Graphene oxide/silver nanocomposite (GO/AgNP) coated nickel-titanium (NiTi) alloy by applying Electrophoretic deposition (EPD) technique at different coating durations. Fifteen nickel-titanium (NiTi) alloy specimens, the size of which was 6x6x1 mm each, were prepared and divided into three groups with five specimens each: uncoated specimens (UC), coated specimens using electrophoretic deposition at a voltage of 20 v for 1 minute (C1), and coated specimens using electrophoretic deposition at a voltage of 20 v for 5 minutes (C5). The coated specimens were characterized by a scanning electron microscope (SEM). Subsequently, the surface wettability was determined by contact angle measurement with a high-resolution optical surface measurement device. The three groups were examined in five different areas after the coating procedure. The average contact angle was determined and recorded. Data were statistically analyzed using One-way ANOVA with a significance level at $p < 0.05$. The result showed that the coating was successfully deposited on NiTi specimens. The uncoated group (UC) displayed the highest contact angle mean ($78.3^\circ \pm 5.5$), followed by C5 group ($72.2^\circ \pm 5.2$) and C1 group ($70.6^\circ \pm 2.5$), respectively. However, there were no significant differences in contact angles among all groups ($p > 0.05$). In conclusion, GO/AgNP coated NiTi alloy using the EPD technique at different coating times had no influence on the surface wettability of NiTi alloys.

Keywords: Graphene Oxide/Silver Nanocomposite (GO/AgNP), Nickel-Titanium (NiTi), Electrophoretic Deposition (EPD), Surface Wettability, Contact Angle

1. บทนำ

ในปัจจุบัน โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม (Nickel-Titanium หรือ NiTi) เป็นหนึ่งในโลหะเจือที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน โดยเฉพาะในทางการแพทย์และทางทันตกรรม เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ที่ดีและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพต่อเนื้อเยื่อร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) ที่ค่อนข้างสูง (Thompson, 2000) โดยโลหะเจือชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์หลากหลายชนิด อาทิเช่น ขดลวดต่างขยายหลอดเลือด (Vascular stent) และขดลวดนำ (Guidewire) ส่วนในทางทันตกรรม เช่น ลวดจัดฟัน (Orthodontic wire) และไฟล์ (Endodontic files) ในงานรักษาคอลงรากฟัน (Petri & Migliavacca,



2011) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โลหะชนิดนี้ก็ยังมีข้อเสียบางประการซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อผลการรักษาซึ่งทำให้เกิดเป็นภาวะแทรกซ้อนในผู้ป่วยบางรายได้ ตัวอย่างเช่น การมีเลือดออกของผนังเนื้อเยื่อจากการถูกพื้นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงของขดลวดต่างขยายหลอดเลือดครูดทั้งขณะที่ทำและหลังทำหัตถการ (Kapnisis et al., 2013) การใช้เวลาในเคลื่อนพื้นทีนานมากขึ้นในการจัดฟัน จากการที่จะต้องใช้แรงในการเอาชนะแรงเสียดทานบนพื้นผิวของโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม (Kumar, Khanam, & Ghafoor, 2016) นอกจากนี้แล้วยังพบว่าผู้ป่วยบางรายที่มีอาการแพ้ต่อปริมาณนิเกิลไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากการที่โลหะชนิดนี้ถูกสภาวะภายในช่องปากกัดกร่อน เช่น เนื้อเยื่อในช่องปากเกิดอาการบวมและอักเสบ เกิดผื่นคันตามร่างกาย มีแผลพุพอง และอาจติดเชื้อรุนแรงจนถึงแก่ชีวิตได้ในผู้ป่วยบางรายได้ (Chakravarthi, Padmanabhan, & Chitharanjan, 2012)

กราฟีน (Graphene) คือวัสดุที่มีการเรียงตัวเพียงชั้นเดียวของธาตุคาร์บอนแบบหกเหลี่ยมรังผึ้ง (Hexagonal honey-comb appearance) ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งของแร่แกรไฟต์ โดยกราฟีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในหลากหลายด้านไม่ว่าจะเป็น การที่มีค่าความแข็งแรงพื้นผิวที่สูง, การเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี (Novoselov et al., 2012; Papageorgiou, Kinloch, & Young, 2017) และการเป็นตัวช่วยที่สามารถลดค่าแรงเสียดทานที่อยู่บนพื้นผิวได้เป็นอย่างดี (Berman, Erdemir, & Sumant, 2014) โดยในปัจจุบันนั้น รูปแบบหนึ่งของกราฟีนที่เป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้ประโยชน์ค่อนข้างมาก นั่นก็คือ กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) หรือกราฟีนที่มีโครงสร้างซึ่งเต็มไปด้วยหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน (Oxygen-containing functional groups) โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบของกราฟีนออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลและทางเคมีที่ดีมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยจากการศึกษาของ Rokaya และคณะในปี 2019 (Rokaya, Srimaneepong, Qin, Siralermukul, & Siriwongrungron, 2019) พบว่าการเคลือบสารประกอบกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตไปบนโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม ส่งผลทำให้โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพื้นผิว (Coefficient of friction) ลดลงรวมไปถึงทำให้ค่าความแข็งพื้นผิว (Surface hardness) สูงขึ้น ตามระยะเวลาในการเคลือบพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้น และ Srimaneepong และคณะ ในปี 2020 (Srimaneepong, Rokaya, Thunyakitpisal, Qin, & Saengkietiyut, 2020) ยังพบว่าโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมที่ถูกเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตนั้นมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนของพื้นผิว (Corrosion resistance) ที่เพิ่มมากขึ้น

อิเล็กโทรโฟริติกเดปโพลิชั่น (Electrophoretic deposition) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการผลิตสารเคลือบหรือฟิล์มบนวัสดุนำไฟฟ้าโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุนำไฟฟ้าจากชั้นเคลือบ โดยกระบวนการนี้อาศัยการเคลื่อนย้ายของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสารละลายไปยังขั้วอิเล็กโทรดภายใต้อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า กระบวนการนี้ค่อนข้างเป็นที่นิยมและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย ใช้เวลาในการเคลือบพื้นผิวน้อย สามารถควบคุมได้ง่าย ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอและกระจายตัวทั่วทั้งผิวนำของวัตถุที่ถูกเคลือบ (Besra & Liu, 2007)



ภาวะการเปียกของพื้นผิว (Surface wettability) เป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของพื้นผิว เพราะเป็นภาวะที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิวซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการยึดเกาะของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microorganism) และรวมไปถึงการสร้างแผ่นคราบจุลินทรีย์หรือไบโอฟิล์ม (Biofilm formation) หากมีการนำวัสดุที่มีการเคลือบพื้นผิวไปประยุกต์ใช้ในส่วนต่างๆ ของร่างกายมนุษย์โดยเฉพาะบริเวณช่องปาก (Cheng, Feng, & Moraru, 2019; Katsikogianni & Missirlis, 2004) โดยหนึ่งในค่าที่น่าเชื่อถือและสามารถบ่งชี้ถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวได้คือ ค่ามุมสัมผัสของพื้นผิว (Contact angle) โดยค่ามุมสัมผัสพื้นผิวจะแปรผกผันกับภาวะความชอบน้ำบนพื้นผิว หากมุมสัมผัสพื้นผิวมีค่าน้อย ภาวะความชอบน้ำของพื้นผิวก็จะมีค่ามาก ซึ่งก็จะเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ เหมาะกับการยึดเกาะของแบคทีเรียจำพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic bacteria) (Donlan, 2002; Sousa, Teixeira, & Oliveira, 2009; Yadav et al., 2017)

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีขึ้นเพื่อเปรียบเทียบภาวะการเปียกของพื้นผิวจากค่ามุมสัมผัสของกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เคลือบอยู่บนโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม ด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีติกเคลปโพลีชันในเวลาที่แตกต่างกัน และจึงเป็นที่มาของสมมติฐานงานวิจัย คือ การเคลือบกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตลงบนแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมด้วยกระบวนการอิเล็กโตรโฟรีติกเคลปโพลีชันไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิว ถึงแม้เวลาที่ใช้ในการเคลือบจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบภาวะการเปียกของพื้นผิวจากค่ามุมสัมผัสของกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เคลือบอยู่บนโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม ด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีติกเคลปโพลีชันในเวลาที่แตกต่างกัน

3. อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นงานโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียม เกรดทางการแพทย์ (Baoji Seabird Metal Material Co., Ltd., China) ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุนิเกิล ไทเทเนียม และธาตุอื่นๆ ในสัดส่วนร้อยละ 55.7 44.8 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมได้ถูกนำมาตัดโดยใช้ลวดนำไฟฟ้า (TROOP CNC wire cut machine, Taipei industries Pte., Ltd., Singapore) ให้ได้ชิ้นงานขนาด 6 x 6 x 1 มิลลิเมตร จำนวน 15 แผ่น จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดให้พื้นผิวเรียบด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีระดับความละเอียด 400 800 1500 และ 2000 กริต ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงาน (BAINPOL VTD, Chennai Metco Pvt., Ltd., India) กำหนดความเร็วที่ 250 รอบต่อนาที จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานไปทำความสะอาดผ่านเครื่องล้างอัลตราโซนิค (Elmasonic S30H, ELMA, DKSH Co., Ltd., Thailand) ที่ความถี่ 37 กิโลเฮิร์ตซ์ ในอะซิโตน แอลกอฮอล์ และน้ำกลั่น เป็นเวลาอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ และหลังจากนั้นนำแผ่นชิ้นงานไปแช่ในสารละลายโครตริเอเจนท์ (Kroll's reagent) ซึ่งประกอบไปด้วยกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาณ 2 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาณ 4 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาณ 994



มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำแผ่นชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที อีกหนึ่งครั้งก่อนจะนำแผ่นชิ้นงานไปเคลือบพื้นผิวต่อไป

3.2 การเตรียมสารละลายกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต

งานวิจัยนี้ได้มีการใช้ผงกราฟีนออกไซด์ (Nanjing Jing Ji Cang Nano Technology Co., Nanjing, China) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ไมครอน จำนวน 5 มิลลิกรัม มาผสมกับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ผ่านกระบวนการโซนิเคชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เป็นสารละลายกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ร่วมกับทำการผสมผงซิลเวอร์ไนเตรด จำนวน 5 มิลลิกรัมในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ผ่านกระบวนการโซนิเคชันเป็นเวลา 20 นาที เพื่อเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดที่มีความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อมาจึงนำสารละลายทั้งสองมาผสมเข้าด้วยกัน ผ่านกระบวนการโซนิเคชันเป็นเวลา 30 นาที (Rokaya, Srimeanepong, Qin, Siraalertmukul, et al., 2019) หลังจากนั้นให้ความร้อนกับการสารละลายผสมนี้จนมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) หรือสารช่วยให้ความคงตัว (Stabilizing agent) ความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตรลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต (Lee & Meisel, 1982) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ผสมสารทั้ง 3 ชนิดเรียบร้อยแล้ว มาทำการโซนิเคชันอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สารละลายกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3 การเคลือบกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตบนชิ้นงานผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโพสิทีฟเคปโพลีชั่น

ทำการต่อวงจรไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ขั้วแอโนดหรือขั้วบวกเป็นแผ่นนิเกิลไทเทเนียม และใช้ขั้วแคโทดหรือขั้วลบเป็นแผ่นตะแกรงโลหะแพลทินัม จุ่มลงในสารละลายกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต ปริมาณ 210 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้ความต่างศักย์คงที่ที่ 20 โวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์อย่างสมบูรณ์ที่แผ่นโลหะทั้งสองฝั่ง โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองในระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 และ 5 นาที หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นเรียบร้อยแล้ว จะทำการนำแผ่นชิ้นงานนิเกิลไทเทเนียมที่ถูกเคลือบเรียบร้อยแล้วมาล้างทำความสะอาดผ่านน้ำกลั่น แล้วนำมาตากแห้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเข้าสู่ขั้นตอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของการต่อวงจรไฟฟ้าในกระบวนการอิเล็กโทรโพธิ์ดิกเคลปโพสิชั่น

3.4 การศึกษาพื้นผิวของแผ่นโลหะเจือไนเกิลไทเทเนียมหลังเคลือบ

3.4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาลักษณะของพื้นผิวทั้งก่อนและหลังเคลือบของแผ่นชิ้นงานโลหะเจือไนเกิลไทเทเนียม ด้วยการนำแผ่นชิ้นงานมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) (JSM-6610LV, JEOL Ltd., Japan) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และที่ความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์

3.4.2 ค่ามุมสัมผัสพื้นผิว

ศึกษาภาวะการเปียกของพื้นผิวจากการวัดค่ามุมสัมผัส ระหว่างหยดน้ำกลั่นขนาด 2 ไมโครลิตรที่สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นชิ้นงานโลหะเจือไนเกิลไทเทเนียมทั้งก่อนและหลังเคลือบ มุมสัมผัสถูกบันทึก ณ วินาทีที่ 5 ด้วยกล้องสามมิติ รายละเอียดสูง (High-resolution three-dimensional optical surface measurement device) (Hebbar, Isloor, & Ismail, 2017; Wang & Yi, 2019) โดยทำการวัดและบันทึกค่ามุมของแผ่นชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 15 แผ่น (5 แผ่นจากแต่ละกลุ่มการทดลอง; กลุ่มที่ยังไม่ถูกเคลือบ (UC), กลุ่มที่ถูกเคลือบเป็นระยะเวลา 1 นาที (C1) และ 5 นาที (C5)) โดยทำการวัด 5 ตำแหน่งต่อหนึ่งแผ่นชิ้นงาน หลังจากนั้นนำค่ามุมทั้ง 5 ตำแหน่ง มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ค่าเฉลี่ยนี้แทนค่ามุมที่วัดและบันทึกได้ต่อหนึ่งแผ่นการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 22 (IBM, Chicago, IL, USA) โดยการทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล (Shapiro Wilk test) และการทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวนของทุกกลุ่มการทดลอง (Levene's test) จากนั้นใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

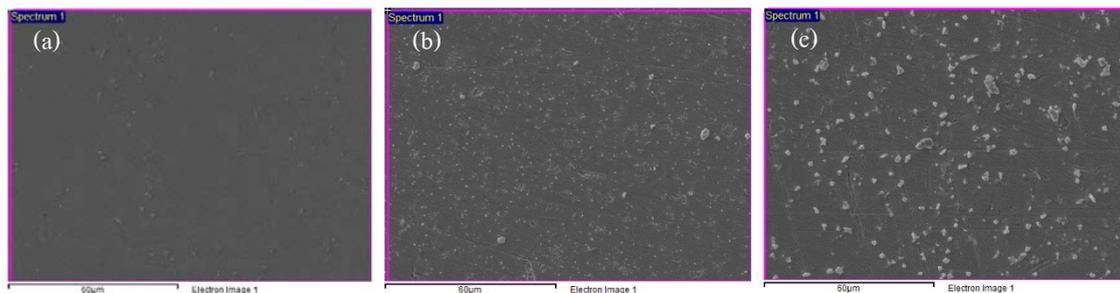


4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิจัย

4.1.1 การศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะของพื้นผิวโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบพื้นผิว (a) มีผิวที่ค่อนข้างเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนในกลุ่มที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวด้วยกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตมานั้น (b, c) พบลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระกระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งผิวน้ำของแผ่นชิ้นงาน และมีความหนาแน่นของสารเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการเคลือบพื้นผิวชิ้นงานที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2

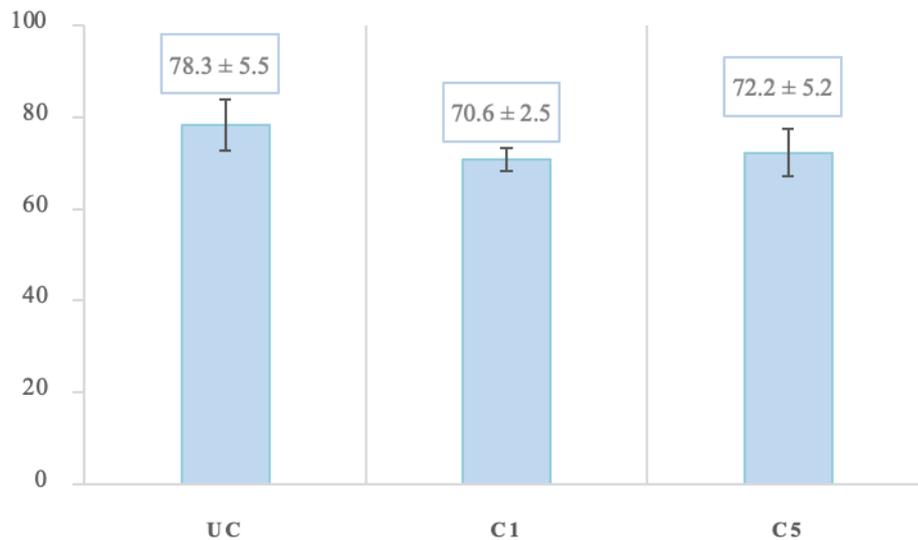


รูปที่ 2 แสดงลักษณะของพื้นผิวของแผ่นชิ้นงาน โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมทั้งก่อนและหลังเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กลุ่ม UC พื้นผิวแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบพื้นผิว (b) กลุ่ม C1 พื้นผิวแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 1 นาที (c) กลุ่ม C5 พื้นผิวแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 5 นาที

4.1.2 การทดสอบค่ามุมสัมผัสพื้นผิว

ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกกลุ่มการทดลองแสดงในรูปที่ 3 โดยพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) กลุ่มการทดลองที่ไม่ผ่านการเคลือบพื้นผิวเป็นกลุ่มการทดลองที่มีค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสสูงที่สุด (78.3 ± 5.5 องศา) รองลงมาคือกลุ่มการทดลองที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 5 นาที (72.2 ± 5.2 องศา) และกลุ่มการทดลองที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวมาเป็นระยะเวลา 1 นาที เป็นกลุ่มที่มีค่ามุมสัมผัสพื้นผิวน้ำต่ำที่สุด (70.6 ± 2.5 องศา) อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$) (Power = 0.98)

ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวของแผ่นชั้นงาน โลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมของทุกกลุ่มการทดลอง

4.2 วิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลการศึกษายอมรับสมมติฐานหลักงานวิจัย คือการเคลือบกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตลงบนแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโฟรีติกเดปโพลีชัน ไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ถึงแม้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบพื้นผิวแผ่นโลหะจะเพิ่มขึ้นจาก 1 นาที เป็น 5 นาทีก็ตาม

จากการทดลองพบว่า ปริมาณกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เคลือบอยู่บนแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น จากระยะเวลา 1 นาที เป็น 5 นาที ของกระบวนการอิเล็กโทรโฟรีติกเดปโพลีชัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Rokaya และคณะในปี 2019 (Rokaya, Srimaneepong, Qin, Siralertmukul, et al., 2019) ที่มีการศึกษาในระยะเวลาเคลือบพื้นผิวที่เท่ากัน แต่ปริมาณสารเคลือบที่เพิ่มมากขึ้นนี้ไม่มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายผลการทดลองดังกล่าวได้จากปริมาณของกราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณของสารทั้งสองชนิดที่เพิ่มมากขึ้น และรวมไปถึงคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic property) ของกราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (Oxygen-containing functional groups) อาทิเช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxylic group) และหมู่อีพอกซี (Epoxy group) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้ผลึกกราฟีนออกไซด์สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้อย่างรวดเร็วและสามารถละลายในน้ำได้โดยง่าย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic character) (Lerf, He, Forster, & Klinowski, 1998; Negut, Grumezescu, Sima, & Axente, 2018) นอกจากนี้แล้วยังมีการทดลองถึงค่ามุมสัมผัสของกราฟีนออกไซด์จากการจำลองพลวัตเชิงโมเลกุล



(Molecular dynamics simulations) โดยพบว่ามีความสัมพันธ์พื้นผิวอยู่ที่ 30 ถึง 60 องศา (Wei, Lv, & Xu, 2014) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ถึงคุณสมบัติความชอบน้ำของกราฟีนออกไซด์ และยังพบว่าคุณสมบัติความชอบน้ำนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาณหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนต่อจำนวนอะตอมของคาร์บอน ยิ่งปริมาณสัดส่วนนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนมีจำนวนมากขึ้น ความชอบน้ำของผลึกกราฟีนออกไซด์ก็จะสูงขึ้น หรือมุมสัมผัสพื้นผิวมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองจากงานวิจัยชิ้นนี้กลับแสดงค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสพื้นผิวที่มีค่าค่อนข้างสูงถึง 70.6 ± 2.5 และ 72.2 ± 5.2 องศา ถึงแม้ว่าปริมาณของกราฟีนออกไซด์บนแผ่น โลหะเจือปนิกิลไทเทเนียมจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เคลือบพื้นผิวก็ตาม ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือ ปริมาณซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เพิ่มมากขึ้น

ในปัจจุบันซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับทางวิศวกรรมนาโนมากขึ้น โดยเฉพาะในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวจากพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) เป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobicity) จากการศึกษาของ Wang และ Yi ในปี 2019 (Wang & Yi, 2019) ได้มีการนำซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตมาเคลือบบนพื้นผิวของเส้นลวดนาโนซิลเวอร์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) โดยวัดจากค่ามุมสัมผัสพื้นผิวที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณของซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตและระยะเวลาเคลือบที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของการมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบระดับนาโนเพิ่มมากขึ้น (Nanoscale-hierarchical structures) โดยโครงสร้างนี้เกิดจากความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นจากปริมาณสารที่มาเคลือบพื้นผิวตามระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบ ซึ่งความขรุขระพื้นผิวนี้จะเป็นผลมาจากการที่พื้นผิวที่ถูกเคลือบมีปริมาณเหลี่ยมคม (Sharp edge) ของอนุภาคซิลเวอร์คอมโพสิตที่เพิ่มขึ้น และเมื่อน้ำมีการสัมผัสกับพื้นผิวที่มีความขรุขระนี้จะเกิดการสะสมของอากาศ (Air trapping) ตามร่องหลุมที่อยู่ระหว่างเหลี่ยมคมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต ซึ่งร่องหลุมเหล่านี้จะเป็นตัวที่ทำให้ปริมาณพื้นผิวที่น้ำสัมผัสกับพื้นผิวที่เคลือบ (Water-solid interface) มีค่าลดลง หรือมีค่ามุมสัมผัสพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง (Cassie & Baxter, 1944; Elliott et al., 2015) และนอกจากนั้นแล้ว Sun และคณะในปี 2015 (Sun et al., 2015) ยังพบว่า กระบวนการที่อนุภาคซิลเวอร์ไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่อยู่รอบผลึกกราฟีนเพื่อเกิดเป็นกราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตนั้น ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจทำให้ค่ามุมสัมผัสพื้นผิวมีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากจำนวนที่ลดลงของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน ซึ่งทำให้ความชอบน้ำมีค่าน้อยลง

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้พื้นผิวที่เคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโนคอมโพสิต ประกอบไปด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ผลการทดลองที่เกิดขึ้นจึงได้รับอิทธิพลจากทั้งสองส่วนนี้ โดยปริมาณซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เพิ่มมากขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งสอดคล้องไปกับความขรุขระพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นจากการศึกษาของ Rokaya และคณะในปี 2019 (Rokaya, Srimanepong, Qin, Siralettmukul, et al., 2019) ที่ได้ทำการศึกษาในกลุ่มเวลาเดียวกัน อาจจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสพื้นผิวที่ลดลงจากปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากราฟีนออกไซด์ซิลเวอร์นาโนคอมโพสิตที่เคลือบบนโลหะเจือปนิกิลไทเทเนียมจากกระบวนการอิเล็กโทรโพสิชั่นนั้นจะมีคุณสมบัติที่ดีในหลากหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็น การลดค่าแรงเสียดทานพื้นผิว การเพิ่มความแข็งพื้นผิวและความต้านทานการสึกกร่อนของโลหะเจือปนิกิลไทเทเนียม (Rokaya, Srimanepong,



Qin, Siralermukul, et al., 2019; Srimaneepong et al., 2020) และรวมไปถึงการเป็นพื้นผิวที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) (Rokaya, Srimaneepong, Qin, Thunyakitpisal, & Siralermukul, 2019) แต่สารเคลือบพื้นผิวที่มีคุณสมบัติที่ดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในทางคลินิกได้จริงนั้น ยังจะต้องมีการทดสอบถึงปัจจัยอีกหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรค, การลดการเกิดแผ่นคราบจุลินทรีย์ที่อาจนำไปสู่โรคที่อันตรายต่อร่างกาย และรวมไปถึงคุณสมบัติทางเชิงกลหรือทางเคมีที่อาจเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบพื้นผิวที่มากขึ้น

5. สรุปผลการศึกษา

กราฟีนออกไซด์ชนิดเวอร์นาโนคอมโพสิตที่ถูกนำมาเคลือบบนแผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีติกเคปโพลีชั่นในระยะเวลาที่แตกต่างกัน นอกจากมีผลทำให้แผ่นโลหะเจือนิเกิลไทเทเนียมมีคุณภาพพื้นผิวที่ดีขึ้นแล้วนั้นยังไม่มีผลทำให้ภาวะการเปียกของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเจ้าหน้าที่และห้องปฏิบัติการวัสดุฉลาด (SMART LAB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์วิจัยวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี และศูนย์วิจัยคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมไปถึงคณะเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการศึกษาครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Berman, D., Erdemir, A., & Sumant, A. V. (2014). Graphene: a new emerging lubricant. *Materials Today*, 17(1), 31-42. doi:10.1016/j.mattod.2013.12.003
- Besra, L., & Liu, M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in materials science*, 52(1), 1-61. doi:10.1016/j.pmatsci.2006.07.001
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday society*, 40(0), 546-551. doi:10.1039/TF9444000546
- Chakravarthi, S., Padmanabhan, S., & Chitharanjan, A. (2012). Allergy and orthodontics. *Journal of orthodontic science*, 1, 83-87. doi:10.4103/2278-0203.105871
- Cheng, Y., Feng, G., & Moraru, C. I. (2019). Micro- and Nanotopography Sensitive Bacterial Attachment Mechanisms: A Review. *Frontiers in microbiology*, 10, 191-191. doi:10.3389/fmicb.2019.00191
- Donlan, R. (2002). Biofilms: Microbial Life on Surfaces. *Emerging infectious diseases*, 8, 881-890. doi:10.3201/eid0809.020063



- Elliott, P. R., Stagon, S. P., Huang, H., Furrer, D. U., Burlatsky, S. F., & Filburn, T. P. (2015). Combined Hydrophobicity and Mechanical Durability through Surface Nanoengineering. *Scientific reports*, 5(1), 9260. doi:10.1038/srep09260
- Hebbar, R., Isloor, A., & Ismail, A. (2017). Contact Angle Measurements. *Membrane characterization*. 219-255. doi: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00012-7
- Kapnisis, K. K., Halwani, D. O., Brott, B. C., Anderson, P. G., Lemons, J. E., & Anayiotos, A. S. (2013). Stent overlapping and geometric curvature influence the structural integrity and surface characteristics of coronary nitinol stents. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 20, 227-236. doi:10.1016/j.jmbbm.2012.11.006
- Katsikogianni, M., & Missirlis, Y. F. (2004). Concise review of mechanisms of bacterial adhesion to biomaterials and of techniques used in estimating bacteria-material interactions. *European cells & materials*, 8, 37-57. doi:10.22203/ecm.v008a05
- Kumar, A., Khanam, A., & Ghafoor, H. (2016). Effects of intraoral aging of arch-wires on frictional forces: An ex vivo study. *Journal of orthodontic science*, 5(4), 109. doi:10.4103/2278-0203.192112
- Lee, P. C., & Meisel, D. (1982). Adsorption and surface-enhanced Raman of dyes on silver and gold sols. *The Journal of Physical Chemistry*, 86(17), 3391-3395. doi:10.1021/j100214a025
- Lerf, A., He, H., Forster, M., & Klinowski, J. (1998). Structure of Graphite Oxide Revisited. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102(23), 4477-4482. doi:10.1021/jp9731821
- Negut, I., Grumezescu, V., Sima, L. E., & Axente, E. (2018). Chapter 11 - Recent advances of graphene family nanomaterials for nanomedicine. In A. M. Grumezescu (Ed.), *Fullerens, Graphenes and Nanotubes* (pp. 413-455): William Andrew Publishing.
- Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., & Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192-200. doi:10.1038/nature11458
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.07.004
- Petrini, L., & Migliavacca, F. (2011). Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. *Journal of Metallurgy*, 2011. doi:10.1155/2011/501483
- Rokaya, D., Srimaneepong, V., Qin, J., Siralermukul, K., & Siritwongrunson, V. (2019). Graphene Oxide/Silver Nanoparticle Coating Produced by Electrophoretic Deposition Improved the Mechanical and Tribological Properties of NiTi Alloy for Biomedical Applications. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 19(7), 3804-3810. doi:10.1166/jnn.2019.16327



- Rokaya, D., Srimaneepong, V., Qin, J., Thunyakitpibal, P., & Siralermukul, K. (2019). Surface Adhesion Properties and Cytotoxicity of Graphene Oxide Coatings and Graphene Oxide/Silver Nanocomposite Coatings on Biomedical NiTi Alloy. *Science of Advanced Materials*, 11(10), 1474-1487. doi:10.1166/sam.2019.3536
- Sousa, C., Teixeira, P., & Oliveira, R. (2009). Influence of Surface Properties on the Adhesion of Staphylococcus epidermidis to Acrylic and Silicone. *International journal of biomaterials*, 2009, 718017. doi:10.1155/2009/718017
- Srimaneepong, V., Rokaya, D., Thunyakitpibal, P., Qin, J., & Saengkiattiyut, K. (2020). Corrosion Resistance of Graphene oxide/Silver Coatings on Ni-Ti alloy and Expression of IL-6 and IL-8 in Human Oral Fibroblasts. *Scientific reports*, 10(1), 3247. doi:10.1038/s41598-020-60070-x
- Sun, X.-F., Qin, J., Xia, P.-F., Guo, B.-B., Yang, C.-M., Song, C., & Wang, S.-G. (2015). Graphene oxide-silver nanoparticle membrane for biofouling control and water purification. *Chemical Engineering Journal*, 281, 53-59. doi:10.1016/j.cej.2015.06.059
- Thompson, S. (2000). An Overview of Nickel-Titanium Alloys Used in Dentistry. *International endodontic journal*, 33, 297-310. doi:10.1046/j.1365-2591.2000.00339.x
- Wang, J., & Yi, G. (2019). Flexible and Superhydrophobic Silver Nanoparticles Decorated Aligned Silver Nanowires Films as Surface-Enhanced Raman Scattering Substrates. *Nanoscale research letters*, 14. doi:10.1186/s11671-019-3117-5
- Wei, N., Lv, C., & Xu, Z. (2014). Wetting of Graphene Oxide: A Molecular Dynamics Study. *Langmuir*, 30(12), 3572-3578. doi:10.1021/la500513x
- Yadav, N., Dubey, A., Shukla, S., Saini, C. P., Gupta, G., Priyadarshini, R., & Lochab, B. (2017). Graphene Oxide-Coated Surface: Inhibition of Bacterial Biofilm Formation due to Specific Surface-Interface Interactions. *ACS Omega*, 2(7), 3070-3082. doi:10.1021/acsomega.7b00371