

1. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากลไกการเกิดการสึกกร่อน (Fretting fatigue) ของวัสดุที่ใช้สำหรับในการผลิตเข่า หรือสะโพกเทียม
2. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของ พื้นผิวจากการปรับปรุงคุณสมบัติของผิว ด้วยวิธีการต่าง ๆ
3. เพื่อหา Parameter ของกระบวนการปรับปรุงผิวแต่ละวิธีที่จะทำให้ พื้นผิวมีความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนอย่างเหมาะสมที่สุด (Optimal parameter for high surface fretting fatigue resistance)

2. บทนำ

ปัจจุบันปริมาณผู้ป่วยที่ต้องทำการผ่าตัดใส่ชิ้นส่วนทดแทนกระดูกมีอัตราเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ อาทิเช่น อุบัติเหตุ ปัญหาด้านสุขภาพของผู้สูงอายุ เป็นต้น แต่เนื่องจากชิ้นส่วนทดแทนกระดูกที่ใช้ได้มาจากการนำเข้าจากต่างประเทศทั้ง 100% จึงทำให้ในแต่ละปีประเทศไทยต้องสูญเสียงบประมาณในส่วนนี้ถึงปีละหลายล้านบาท รวมถึงจากสภาพการใช้งานและสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นอันเป็นสาเหตุให้ต้องทำการผ่าตัดเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ (Revision surgery) ให้แก่ผู้ป่วยในระยะเวลาที่เร็วเกินไป (Aseptic loosening) ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายและสภาพการดำเนินชีวิตของผู้ป่วย

จากปัญหาดังกล่าวหากได้มีการพัฒนาและศึกษาการผลิตชิ้นส่วนทางการแพทย์ขึ้นภายในประเทศที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของคนไทย จะช่วยให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน ทั้งด้านเศรษฐกิจ โดยจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าชิ้นส่วนจากต่างประเทศ ในด้านสังคม สามารถลดค่าใช้จ่ายในการรักษาและเพิ่มคุณภาพชีวิตให้กับประชาชนในประเทศ และในด้านการพัฒนาองค์ความรู้ที่จะเกิดขึ้นในประเทศไทย

ในกระบวนการพัฒนาชิ้นส่วนทางการแพทย์นอกจากการพัฒนากระบวนการผลิตและคุณสมบัติของวัสดุแล้ว จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิว ที่จะทำการผ่าตัดปลูกฝังเข้าไปในร่างกายมนุษย์ เมื่อชิ้นส่วนดังกล่าวอยู่ภายในร่างกายต้องมีคุณสมบัติในการรับภาระที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ ได้แก่ การรับภาระทางกล (Mechanical load) ภาระทางเคมี (Chemical load) และภาระอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเสียดสีของพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงาน (Friction)

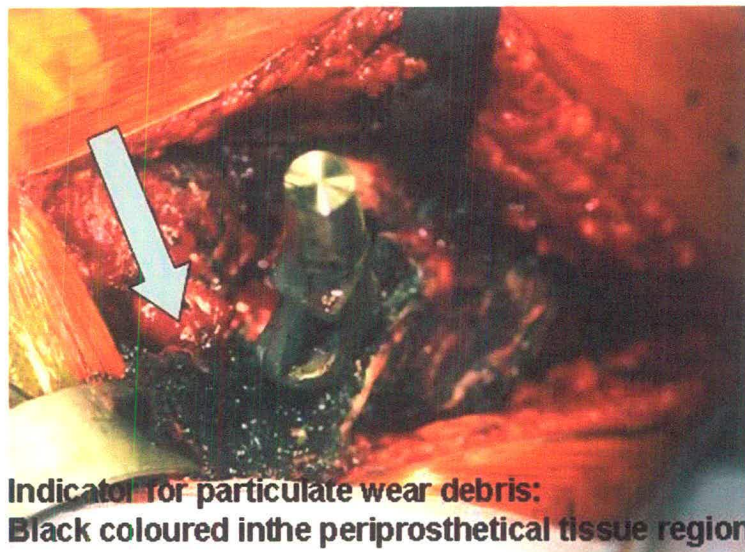
ในทางการแพทย์ที่มีการผ่าตัดเพื่อใส่เข่าเทียมหรือสะโพกเทียมจากโลหะประเภทไททาเนียมผสมให้กับคนไข่นั้น ปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่าตัดเสร็จสิ้นไปแล้วคือ อาการที่เรียกว่า ภาวะหลวมคลอนของเข่าหรือสะโพกเทียมก่อนกำหนด (Early aseptic loosening) ในคนไข้ ภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน

กรณีที่ต้องมีการผ่าตัดเพื่อใส่เข้าเทียมหรือสะโพกเทียมจากโลหะประเภทไททาเนียมผสมให้กับคนไข้ นั้น ปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่าตัดเสร็จสิ้นไปแล้วคือ อาการที่เรียกว่า ภาวะหลวมคลอนของเข้าหรือสะโพกเทียมก่อนกำหนด (Early Aseptic Loosening) ในคนไข้ ภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการด้วยกัน คือ

1. เกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระ (Load) ที่กระทำต่อกระดูกทั้งในเชิงขนาด และทิศทาง (Stress shielding) เนื่องจากการใส่วัสดุฝังใน

2. เกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ กับเซลล์กระดูกโดยรอบของวัสดุฝังในในกระดูกสะโพก (Periprosthetic cell reaction with foreign particle) โดยที่อนุภาคเล็ก ๆ มีต้นตอมาจากวัสดุฝังในในกระดูกสะโพกสึกหรอ (Wear debris) จากการที่วัสดุฝังในในกระดูกสะโพกเกิดการเคลื่อนที่แบบสัมผัส (Micro motion) และเกิดการเสียดสี (Friction) ซึ่งเราเรียกการหลวมคลอนที่มีสาเหตุจากอนุภาคเล็ก ๆ นี้ว่า "Wear disease"

การเกิดอนุภาคขนาดเล็กของโลหะ (Metal abrasive wear particles) จากการสึกกร่อนของพื้นผิว (Fretting fatigue) ของเข้าหรือสะโพกเทียม อันมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบสัมผัสบนพื้นผิวคู่สัมผัสทำให้เกิดกระบวนการเสื่อมสลายของกระดูกของคนไข้ (Osteolysis) และทำให้เกิดภาวะหลวมคลอน (Aseptic loosening) ในที่สุด (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ซ้าย) ภาพแสดงสะโพกเทียมก่อนใส่ให้คนไข้ ขวา) ภาพแสดง Particulate wear debris สีดำขณะผ่าตัดนำ สะโพกเทียมออกจากคนไข้ กรณีการเกิด Aseptic loosening

การป้องกันมิให้เกิดภาวะดังกล่าว สามารถทำได้โดยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน (Fretting fatigue resistance) ของพื้นผิวโลหะผสมไททาเนียม ด้วยวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งภายใต้โครงการวิจัยนี้ จะทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน (Fretting fatigue resistance) ของพื้นผิวโลหะไททาเนียมผสมด้วยวิธี ดังนี้

1. การขัดละเอียดด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electropolishing)
2. การปรับปรุงลักษณะทางจุลภาคของผิว (Microscopic surface topography) ด้วยวิธีการยิงด้วยเม็ดอลูมินา เม็ดซิลิกาหรือเม็ดเหล็ก (Al_2O_3 , SiO_2 - Sand blasting or Shot peening)
3. การเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition: PVD Surface Coating)
4. การปรับปรุงคุณภาพผิวแบบผสม โดยนำข้อดีของแต่ละกระบวนการมาผสมกัน

หลังจากนั้นจะทำการทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพของวัสดุและลักษณะของพื้นผิว และปริมาณของ Abrasive wear particle ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างชุดทดสอบขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทนทานต่อความสึกกร่อน (Fretting fatigue resistance)

3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

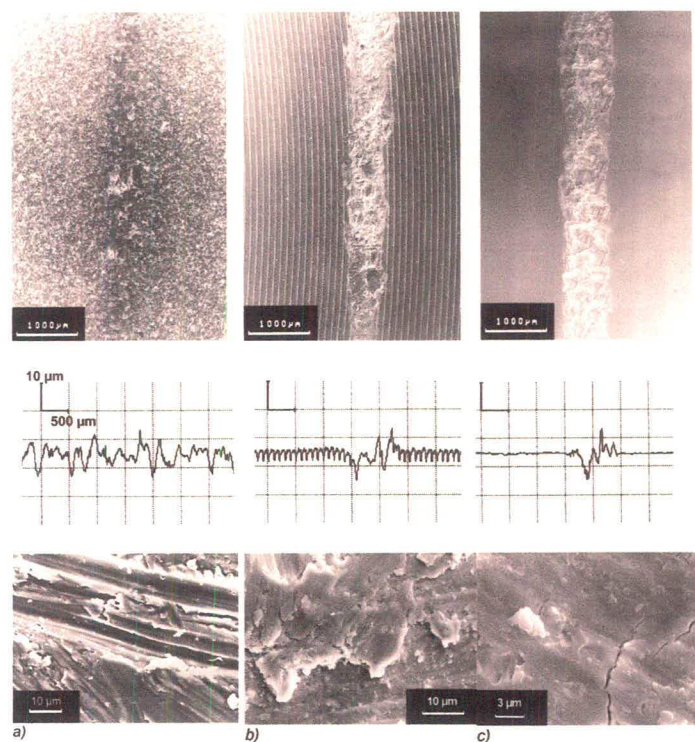
จากปัญหาทางการแพทย์ในกรณีที่เกิด ภาวะหลวมคลอนของเข่าหรือสะโพกเทียมก่อนกำหนด (Early aseptic loosening) ในคนไข้ โดยสาเหตุหนึ่งที่สำคัญคือ การเกิดอนุภาคขนาดเล็กของโลหะ (Metal abrasive wear particles) จากการสึกกร่อนของพื้นผิว (Fretting fatigue) ของเข่าหรือสะโพกเทียม อันมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบสัมผัสบนพื้นผิวคู่สัมผัส ซึ่งอาการดังกล่าว ส่งผลให้เกิดความไม่มั่นใจต่ออวัยวะเทียมที่จะนำไปผ่าตัดใส่ในตัวคนไข้ ถึงแม้ว่าอวัยวะเทียมดังกล่าวจะผ่านการทดสอบตามมาตรฐานมาแล้วก็ตาม ซึ่งในการที่จะพัฒนาความสามารถในการต้านทานสึกกร่อนของผิวโลหะไททาเนียมผสม จะต้องเข้าใจกระบวนการทาง Tribology ที่เกิดขึ้นระหว่างอวัยวะเทียมกับสิ่งแวดล้อมในร่างกายมนุษย์เป็นอย่างดี โครงการวิจัยนี้จะอธิบายกระบวนการเกิด Metal abrasive wear particles และสามารถอธิบายได้ว่า ลักษณะของพื้นผิวนอวัยวะเทียมจะต้องมีคุณสมบัติอย่างไร จึงจะสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดีที่สุด ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่

- ความหยาบผิวและรูปร่างของผิวระดับอนุภาค (surface roughness and microscopic topography)
- ความแข็งของผิว (Surface hardness) และค่าความเค้นตกค้างภายใต้ผิว (Residual stress in surface layer)
- ส่วนผสมทางเคมีของชั้นผิว (Chemical composition of surface layer)
- ความสามารถในการเกาะตัวระหว่างชั้นของผิว (Surface layer adherence)

จากการศึกษาของ Choungthong พบว่า มีการเกิดการสึกกร่อนแบบ abrasive wear และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ Plastic deformation ที่บริเวณของ Peak of roughness ซึ่งค่าของความเรียบผิวนั้นขึ้นงานของโลหะไททาเนียมผสมนี้ จะส่งผลต่อปริมาณของ Abrasive

wear particle ที่วัดได้ ยิ่งความหยาบผิวสูงมากเท่าไร จะทำให้ปริมาณของ Abrasive wear particle สูงขึ้นตามไปด้วย [1]

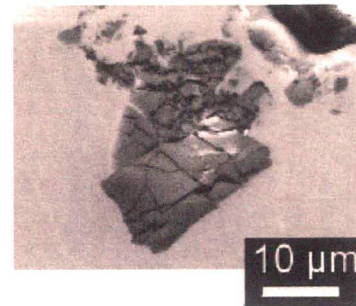
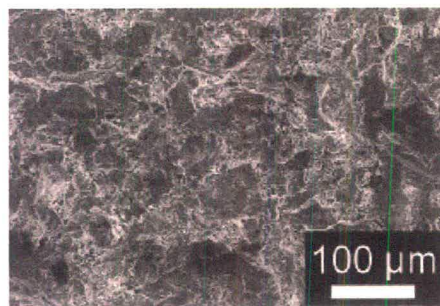
Ababneh ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบการสึกกร่อนของผิวด้วยวิธีการ Pin on disk โดยทำการเปรียบเทียบในเชิงปริมาณ ของผิวโลหะไททาเนียมที่ทำการปรับปรุงผิวด้วยวิธี Shot peening, Machining และ Electropolishing (รูปที่ 2) ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่า การปรับปรุงผิวโลหะไททาเนียมด้วยวิธี Shot peening จะทำให้เกิดความสึกกร่อนของผิวโลหะได้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบและเปรียบเทียบการสึกกร่อนในเชิงปริมาณด้วย นอกจากนี้ วิธีการที่ใช้ปรับปรุงความหยาบผิวสำหรับ ชิ้นงานโลหะไททาเนียมผสม คือ การขัดผิวอย่างละเอียดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electropolishing) ซึ่งจะได้ความเรียบผิวสูง แต่ข้อเสียคือ จะไม่มีความเค้นตกค้างแบบกด ภายใต้ผิวชิ้นงาน (Compressive residual stress layer) เมื่อดำเนินการทดสอบชิ้นงาน เป็นระยะเวลาสั้น จะพบว่าที่ผิวของชิ้นงาน เกิดความเสียหายแบบ Surface disruption โดยมีรอยแตก (Cracks) ตั้งฉากกับแนวของการสึกกร่อน (รูปที่ 2 c) ส่งผลให้เกิด Metal wear particle สูงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีความเรียบผิวต่ำ แต่มีชั้นของ Compressive residual stress layer ที่เกิดจากการทำ Shot peening ด้วยเม็ดเหล็ก (รูปที่ 2 a) [2]



รูปที่ 2 ภาพแสดงการสึกกร่อนของผิวโลหะไททาเนียมผสมจากการปรับปรุงผิวด้วยวิธี a) ยิงด้วยเม็ดเหล็ก (Shot peening), b) ใช้วิธีการ Machining, c) Electro polishing [2]

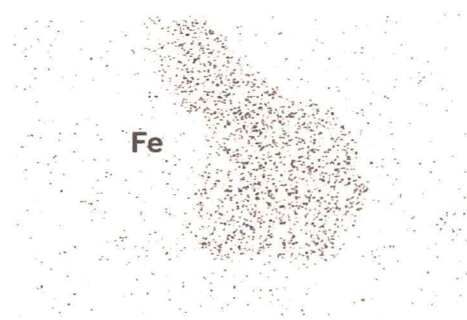
ปัจจัยที่สำคัญที่สุดเรื่องหนึ่งคือ ความปลอดภัยจากการปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงาน (Surface contamination) ที่เป็นอันตรายต่อระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกายมนุษย์ จากการศึกษาของ Choungthong et al. พบว่า ในการปรับปรุงคุณภาพผิวด้วยวิธีการยิงเม็ดอลูมินาหรือเม็ดเหล็กนั้น (Sand blasting/ Shot peening) บางครั้งจะพบการปนเปื้อนของเศษอลูมินาและเศษเหล็กตกค้างอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานประเภทโลหะผสมไททาเนียม โดยที่

1. ในกรณีของการพบเศษอลูมินาตกค้างอยู่บนผิวของชิ้นงานไททาเนียมผสมนั้น (รูปที่ 3) เศษอลูมินาที่ตกค้างนั้นมีความแข็งสูงกว่าโลหะไททาเนียมมาก จะส่งผลให้เกิดการขัดสีระหว่างผิวเพิ่มมากขึ้น และเกิดปริมาณของ Abrasive wear particle มากตามมา เมื่อนำไปใช้งานจริง [3]



รูปที่ 3 (ซ้ายมือ) รูปจากการถ่ายด้วยกล้อง SEM บนผิวของการปรับปรุงผิวโลหะไททาเนียมด้วยวิธีการยิงเม็ดอลูมินา (ขวามือ) ภาพตัดขวางแสดงเศษของเม็ดอลูมินาที่ฝังตัวอยู่ในโลหะไททาเนียม [3]

2. ในกรณีของการพบเศษเหล็กตกค้าง (รูปที่ 4) เศษเหล็กดังกล่าวเป็นสารที่จะเป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการผุกร่อนได้เร็วขึ้น (Corrosion process) และเป็นอันตรายอย่างมากต่อร่างกายมนุษย์ ทำให้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพผิวของโลหะไททาเนียมด้วยการยิงเม็ดเหล็กนั้นไม่ควรที่จะนำมาใช้ในภาคการผลิตจริง ๆ เพราะการควบคุมไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของผิวโลหะไททาเนียมจากเหล็กนั้นทำได้ลำบาก [1]



รูปที่ 4 ซ้ายมือ) ภาพ SEM แสดงเศษเม็ดเหล็ก SEM บนผิวโลหะไททาเนียม ขวามือ) ผลการวิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive X- ray analysis (EDX) [1]

การเคลือบผิวด้วยวิธี PVD โดยใช้ สารเคลือบ TiN ซึ่งมีความแข็งแรงสูง สามารถป้องกันการสึกกร่อนของผิวงานได้ดี โดยเฉพาะการป้องกันการเกิด Fretting fatigue [4] อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในการเคลือบผิวด้วยวิธี PVD คือ ความแข็งแรงในการยึดตัวกันระหว่างชั้นของชั้นงาน และชั้นที่เคลือบมีความแข็งแรงต่ำ (Weak adhesion between coating layer and substrate) ส่งผลให้การใช้งานในระยะยาว (Poor durability during long term fretting) เป็นข้อเสียต่อการเกิดปริมาณของ Wear particle โดยเฉพาะถ้าเป็นการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง และมีการแตกหักของชั้นเคลือบหลุดออกมาแล้ว Wear particle ที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูง เพราะวัสดุที่เคลือบผิวนั้นก่อให้เกิดการสึกกร่อนของชั้นงานเพิ่มขึ้นสูงมาก (Severe wear problem) [5]

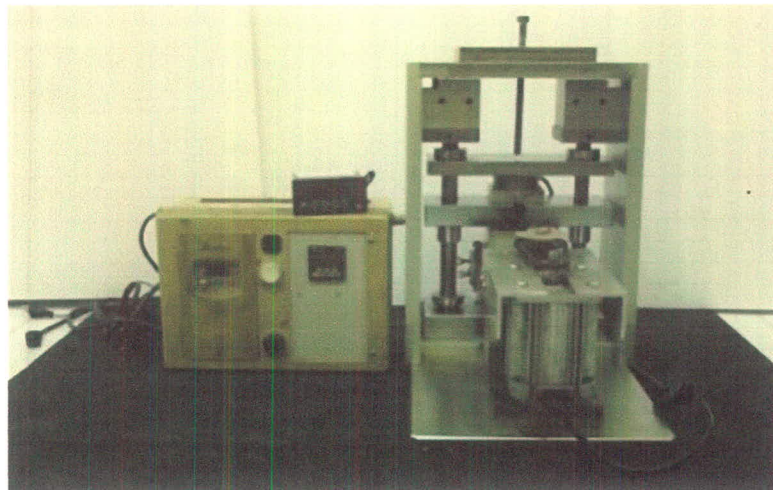
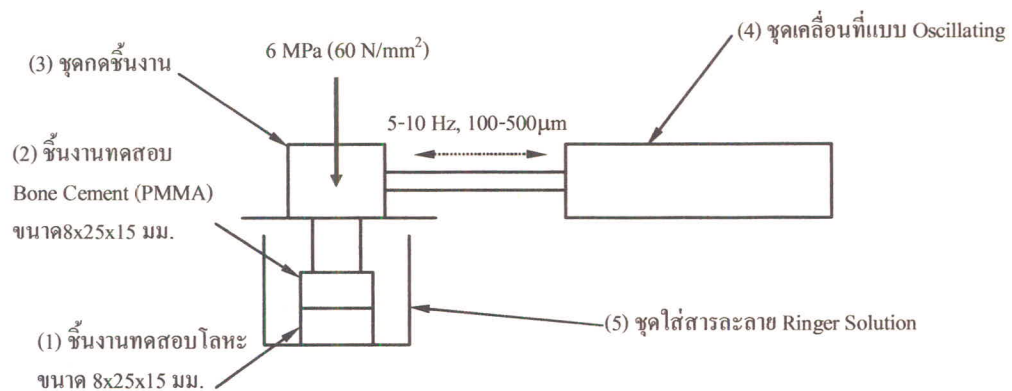
Schuh et al ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของผิว โลหะไททาเนียมผสม (TiAl6Nb7) เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ของ ยุโรป EN 12010 ในเรื่องของการปลอดจากวัสดุตกค้าง (Residual particle free implant surface) จากการปรับปรุงผิวด้วยวิธี Sand blasting ด้วยเม็ดอลูมินา Al_2O_3 ที่มีความแข็งแรงสูง ที่อาจก่อให้เกิดการเสียดสี และสึกกร่อนอย่างรุนแรงบนผิวชั้นงานของเข้าหรือสะพานเทียมได้ ด้วยวิธีการทำความสะอาดผิวจากการยิงด้วยเม็ดอลูมินา ด้วยวิธีการกัดกรด [6]

4. วิธีทดลอง

4.1 สร้างเครื่องมือในการทดสอบ wear testing test

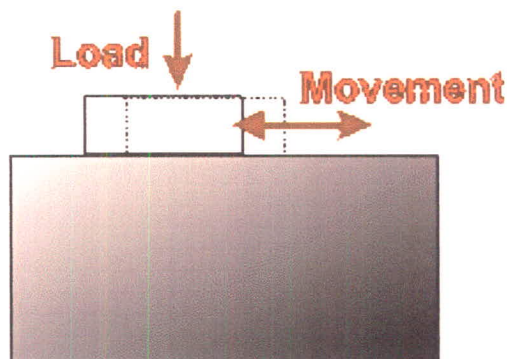
เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในร่างกายมนุษย์ที่ใส่อวัยวะเทียมประเภทเข้าหรือข้อต่อ (Quasi in vivo joint simulator) โดยจะเน้นที่ให้การเคลื่อนที่ของผิวคู่สัมผัสนั้น มีการเคลื่อนที่แบบ Low amplitude oscillated movement ตลอดจนมีการทดลองในสภาวะเปียก โดยใช้สารละลาย ที่เรียกว่า Ringer's solution เพื่อสร้างแบบจำลองในการทดสอบให้ใกล้เคียงกับสภาวะในร่างกายมนุษย์มากที่สุด

แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้เป็นตัวชี้วัดว่า พื้นผิวที่ปรับปรุงแล้วด้วยวิธีการใด จะส่งผลให้เกิดความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนได้ดี (ดูรูปที่ 5)



รูปที่ 5 หลักการชุดทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุทางการแพทย์ (Wear testing devices)

โดยการออกแบบนั้นอาศัยแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ที่ต่อสายพานส่งผ่านไปยังลูกเบี้ยว ส่งผลให้ชุดจับชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบเส้นตรง และบังคับการเคลื่อนที่ไปกลับโดยใช้สปริงน้ำหนักที่กดชิ้นงานเกิดจากสกรู โดยมี Load cell แสดงค่าแรงกด และชุด Controller ทำหน้าที่กำหนดควบคุมความถี่และจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวซีเมนต์กระดุกกับชิ้นงานไทเทเนียม รูปที่ 6 โดยให้การทำงานของเครื่องทดสอบเคลื่อนที่ เกิดการเสียดสีที่ผิวชิ้นงานของไทเทเนียม และ ซีเมนต์กระดุก และมีแรงกดที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมี contact pressure 6 MPa โดยมี Load cell ควบคุมแรงในการกดชิ้นงาน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและแรงกด

4.2 การเตรียมวัสดุสำหรับชิ้นงานทดสอบ

4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ไททาเนียมอัลลอยด์ เกรด Ti-6Al-4V

ชิ้นงานทดสอบเป็นโลหะไททาเนียมผสม เกรด ASTM F136 (ELI) มีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 1 และที่สมบัติทางกลตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของ Ti-6Al-4V

	N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
wt. %	0.02	0.08	0.08	0.14	0.13	6.03	3.99	bal.

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของ Ti-6Al-4V

Tensile Strength	1000 MPa
0.2% Proof Stress	910 MPa
Elastic Modulus	114 GPa
Hardness	36 HRC
Charpy, V-Notch Impact	24 J

Bone Cement

ซีเมนต์ทดสอบหรือ Cranioplastic ทำมาจาก Methyl Methacrylate resin ซึ่งใช้สำหรับการซ่อมแซมกระดูกที่สึกหรอ เกิดจากส่วนผสม 2 ชนิด คือ ผงโพลิเมอร์และโมโนเมอร์เหลว โดยมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของผงโพลิเมอร์

Methyl methacrylate polymer	79.63%
Styrene copolymer	19.84%
Benzyl peroxide	0.8%

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบของโมโนเมอร์เหลว

Methyl methacrylate monomer	95.05 %
Ethylene dimethacrylate monomer	4.28 %
Dimethyl-p-toluidine	0.67 %
Hydroquinone	75 ppm
4-methoxyphenol	12 ppm

น้ำเกลือสำหรับการทดสอบ (Simulated Body Solution)

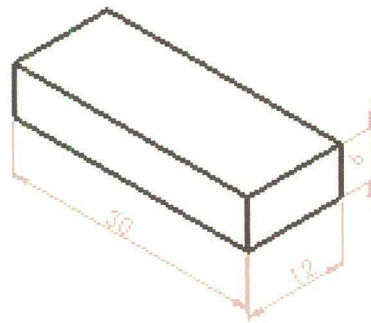
ในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานในสภาวะเปียก เพื่อจำลองสภาวะการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานวัสดุฝังในและกระดูกมนุษย์ ซึ่งจะมีของเหลวเช่น เลือดและพลาสมาอยู่ระหว่างผิวสัมผัส ผู้วิจัยได้ใช้น้ำเกลือ (Infusion) ของบริษัท ไทยโอซูกา จำกัด โดยน้ำเกลือมีส่วนผสมตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนผสมของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ (simulated body fluid)

ส่วนผสม	Sterilized water	NaCl	Dextrose Monohydrate
มวล (g)	1000	4.5	50

4.2.2 ขนาดของชิ้นงานไททาเนียมที่ทำการทดสอบ

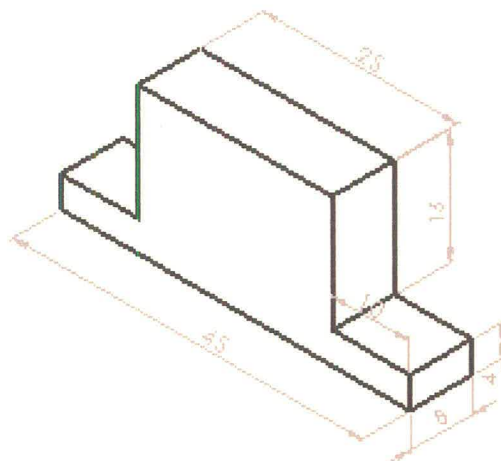
นำชิ้นงานไททาเนียมมาตัดด้วยวิธีการ Milling ให้มีขนาดตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานไททาเนียม

4.2.3 ขนาดของชิ้นงานซีเมนต์กระดูก

นำผงซีเมนต์กระดูกมาผสมกับน้ำยาโมโนเมอร์ แล้วนำไปเทขึ้นรูปในแม่พิมพ์ให้มีขนาดและรูปร่างตามรูปที่ 8



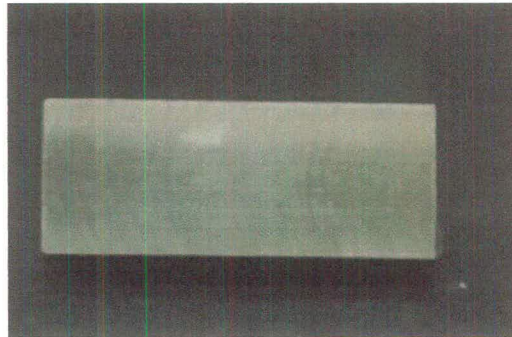
รูปที่ 8 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานซีเมนต์

4.3 การเตรียมผิวชิ้นงาน

ทำการปรับความเรียบผิวของชิ้นงานไทเทเนียม โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

4.3.1. ชิ้นงานเปรียบเทียบ (Reference Specimen)

ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านการตัดและ Milling ใช้เป็นชิ้นงานเปรียบเทียบ ซึ่งไม่ต้องนำชิ้นงานไปปรับปรุงผิวอีก ลักษณะผิวตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านการ Milling

4.3.2. ชิ้นงาน Sand blasting

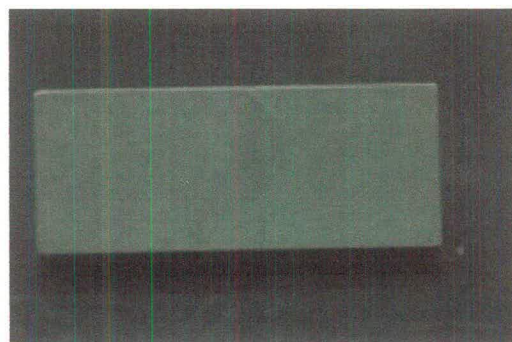
นำชิ้นงานไทเทเนียมมายิงทรายด้วยทรายอลูมิเนียมออกไซด์ ความละเอียด A 60 โดยผงอลูมิเนียมมีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 6 และสมบัติทางกลตามตารางที่ 7 ด้วยเครื่องยิงทรายด้วยความดัน 6 bar ได้ลักษณะผิวชิ้นงานตามรูปที่ 10

ตารางที่ 6 ส่วนผสมทางเคมีของผงอลูมิเนียม A 60

	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	Na_2O
wt%	99.1	0.20	0.08	0.03	0.01	0.18

ตารางที่ 7 สมบัติทางกลของผงอลูมิเนียม A 60

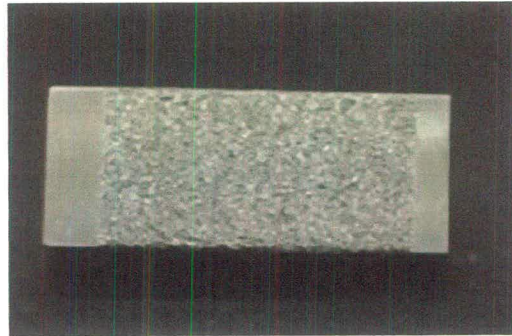
Color	White
Specific density	3.92
Melting point	2000 °C
Hardness	9.0 Mohs



รูปที่ 10 ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านการยิงทราย

4.3.3 ชิ้นงาน Shot Peening (Steel shot)

ชิ้นงานไททาเนียม ที่ผ่านกระบวนการ Shot peening ด้วยการยิงในเครื่องยิงแบบ rotary wheel ซึ่งใช้พาราเมเตอร์เกี่ยวกับการผลิตสปริงและแหวนในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ของบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมผิว ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านการ Shot Peening

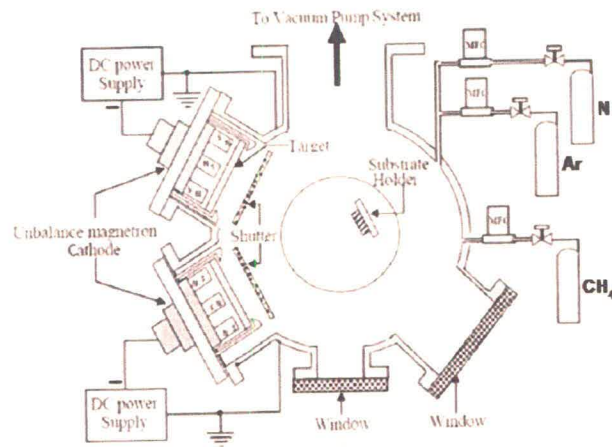
4.3.4 เคลือบผิวชิ้นงานด้วย TiN

ชิ้นงานไททาเนียมที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานแล้ว อีกชุดหนึ่งจะส่งไปเคลือบผิวผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธี Cathodic Arc Plasma Vapor Deposition เพื่อสร้าง TiN Film ด้วยเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ ยี่ห้อ Walther รุ่น NZ 333 ความดันในห้องเคลือบ 0.003 bar อุณหภูมิเคลือบ 300 °C เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของผิวเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

4.3.5 เคลือบผิวชิ้นงานด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมคาร์โบไนไตรด์

$TiAlVC_xN_y$

การเคลือบผิวชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพแบบ DC unbalance magnetron Sputtering วัสดุฟิล์มบางที่ใช้เคลือบคือไทเทเนียมอลูมิเนียมคาร์โบไนไตรด์ ($TiAlVC_xN_y$) ก่อนทำการเคลือบผิวต้องล้างชิ้นงานด้วย Trichloroethylene และ Acetone ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ตามลำดับอย่างละ 10 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานใส่เข้าไปในถังเคลือบผิวสุญญากาศ ดังรูปที่ 12 เปิด rotary pump จนความดันใน chamber มีค่าความดัน เท่ากับ 8.0×10^{-2} mbar จากนั้นเปิด Diffusion pump ทำงานควบคู่กันไปจนความดัน เท่ากับ 2×10^{-4} mbar ชิ้นงานได้รับความร้อนจากแท่งขดลวดความร้อนจนมีอุณหภูมิภายในถึง 150 °C หลังจากนั้น จึงทำการ pre sputtering target ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 3 นาที ก่อนที่จะทำการเคลือบผิว จากนั้นจึงปล่อยก๊าซมีเทนและไนโตรเจนเข้าสู่ถังเคลือบตามสภาวะในการเคลือบผิวดังแสดงในตารางที่ 8 สภาวะในการเคลือบผิว



รูปที่ 12 ระบบการเคลือบผิวแบบ DC unbalance magnetron sputtering

ตารางที่ 8 สภาวะในการเคลือบผิว

Coating parameter	Value
Base pressure	2×10^{-4} mbar
Working pressure	4×10^{-3} mbar
Ar Flow rate	3 sccm
N ₂ Flow rate	2.4 sccm
CH ₄ Flow rate	0.3-0.7 sccm
Electrical Current	800 mA
Electrical Voltage	400 V
Temperature	150 °C
Time	90 min
Substrate/ target distance	15 cm

4.4 ทดสอบชิ้นงานไททาเนียมใน Wear testing device

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือการทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง (Dry condition) และสภาวะเปียกโดยใช้สารละลายน้ำเกลือ (Simulated Body Fluid) โดยการทดสอบทั้งสองสภาวะ ภายใต้เงื่อนไขความกดดัน (Surface pressure) บนผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานโลหะไททาเนียมกับชิ้นงานซีเมนต์กระดูก โดยกำหนดค่าแรงดันผิว (contact pressure) คงที่ 6 MPa และเช่นเดียวกับกำหนดขนาดแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่แบบสลับมีค่าคงที่ 100 ไมครอน โดยการทดลองขั้นตอนนี้ จะนำชิ้นงานมาทำการทดลอง จำนวน 100,000, 500,000 และ 1,000,000 รอบ เพื่อที่จะหาความสามารถการต้านทานการสึกหรอในเชิงคุณภาพ

4.4.1 วัดความเรียบผิว

นำชิ้นงานที่ได้เตรียมผิว หลังผ่านการทำ Milling, ยิงทราย (Sand Blasting) และยิงเม็ดเหล็ก (Shot peening) และหลังจากเคลือบผิวด้วยกายภาพ (Cathodic Arc Physical Vapor Deposition) มาวัดความเรียบผิว Rz ด้วยเครื่อง Surface Roughness Measurement SurfTest ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SV-2100 บนชิ้นงานสามบริเวณ และนำมาหาค่าเฉลี่ย

4.4.2 ตรวจดูสัณฐานของพื้นผิว

นำชิ้นงานที่ผ่านการวัดความเรียบผิวแล้ว มาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical light microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น DP12 ก่อนและหลังการทดสอบ wear testing device โดยจะตรวจดูที่ผิวชิ้นงาน ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ ที่ 100,000 รอบ 500,000 รอบ และ 1,000,000 รอบ และในกรณีที่พบการสึกหรอ หรือ ผิววัสดุถูกทำลาย (Surface Damage) จากกลไกการเสียดสี (Abrasive wear mechanism) และการแตกหัก (Crack Formation) จะตรวจสอบบริเวณดังกล่าวด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope)

4.5 ทดสอบการสึกหรอชิ้นงานไททาเนียมในเชิงปริมาณ

นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาวัดค่าขรุขระผิวด้วยเครื่อง 3D measuring laser microscope รุ่น OLS 400 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความหนาของชั้นผิวเคลือบ ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope/SEM รุ่น S4700 FE-SEM วัดส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เทคนิค SEM/EDS ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffraction/XRD รุ่น TTRAX III วัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ด้วยเครื่อง Nano Indentation tester (CSM) วัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยเครื่อง Micro scratch tester (CSM) ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Fretting wear test machine และวัดค่าปริมาตรการสึกหรอด้วยเครื่อง 3D measuring laser microscope รุ่น OLS 400

4.6 การทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility test) ด้วยวิธี

ทดสอบทางอ้อมแบบ MTT cytotoxicity assay

การทดสอบนี้ทดสอบชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วย $\text{TiAlVC}_x\text{N}_y$ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย $\text{TiAlVC}_x\text{N}_y$ ภายใต้สภาวะการไหลของก๊าซมีเทน (CH_4) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.3, 0.5 และ 0.7 sccm โดยนำชิ้นงานที่จะทดสอบไปทำการนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งระบบอัตโนมัติ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121°C นาน 15 นาที หลังจากนั้นนำเซลล์ L929 ที่มีความเข้มข้น 1×10^5 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในอาหารเลี้ยง MEM completed medium เติมลงในจานเพาะเลี้ยงชนิด 96 หลุม จำนวน 200 ไมโครลิตร/หลุม นำไปบ่มเพาะตามสภาวะดังตารางที่ 2 สภาวะตู้ CO_2 Incubator จะได้เซลล์ลักษณะเป็นชั้นเดียว (Monolayer) จากนั้นดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ออก เติม Extract ของชุดควบคุมและตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ลงไปหลุมละ 100 ไมโครลิตร โดยการ Extraction แบ่งเป็น ชุดควบคุม Reagent control ได้แก่

การศึกษาการสึกกร่อน ภายใต้สภาวะใกล้เคียงกับร่างกายมนุษย์ หลังจากการปรับปรุงคุณภาพผิว

อาหารเลี้ยงเซลล์ที่เตรียมภายใต้สภาวะเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ปราศจากตัวอย่างที่ทดสอบ ชุดควบคุม Negative control material (วัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ) ได้แก่ วัสดุ Thermanox (Nunc) cover slips โดย Extraction ratio ที่ใช้ในการทดสอบคือ $6 \text{ cm}^2/\text{ml}$ แخذใน Extraction vehicle ชุดควบคุม positive control material (วัสดุที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ) ได้แก่ วัสดุ Polyurethane film containing 0.1% Zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC): RM-A โดย Extraction ratio ที่ใช้ในการทดสอบคือ $3 \text{ cm}^2/\text{ml}$ นำไปบ่มเพาะในตู้ CO_2 incubator ที่สภาวะเดิม (ตารางที่ 2) จากนั้นดูด Extract ของชุดควบคุมและตัวอย่างที่ต้องการทดสอบออก แล้วเติม MTT ความเข้มข้น 0.5 mg/ml ลงในจานเพาะเลี้ยงหลุมละ 100 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปบ่มเพาะในตู้ CO_2 Incubator ที่อุณหภูมิ 37°C , ความชื้นสัมพัทธ์ 95% , 5.0 % CO_2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ดูด MTT ออก ล้างด้วย PBS 1 ครั้ง แล้วเติม DMSO (Dimethyl sulfoxide) หลุมละ 100 ไมโครลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate reader รุ่น UVM 340 เพื่อดูเปอร์เซ็นต์จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต

5. ผลการทดลอง

5.1 ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยทั้งหมด

ความเรียบผิวที่ได้ มีค่าความเรียบผิวต่างกัน โดยความเรียบผิวที่ได้จาก ชั้นงานที่ผ่านการ Milling จะมีค่าต่ำสุด คือ 2.2 ไมครอน ค่าความเรียบผิวจากการยิงทรายมีค่าความเรียบผิว รองลงมา คือ 4.5 ไมครอน และค่าความเรียบผิวที่ได้จากการทำ shot peening มีค่าความเรียบผิวสูงสุดคือ 34.2 ไมครอน ตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยชั้นงานก่อนทดสอบการสึกหรอ

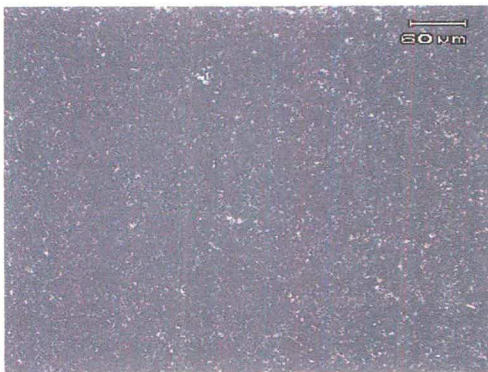
ชั้นงานผ่านการ	ความเรียบผิว Rz (μm)	
	ก่อนเคลือบ TiN	หลังเคลือบ TiN
Milling (Reference Specimen)	2.2	ไม่ได้เคลือบ TiN
Sand blasting (SiO_2 90-150 μm)	4.5	6.4
Sand blasting (Al_2O_3 220 μm)	7.5	8.2
Shot peening (Fe 90-150 μm)	34.2	36

5.2 ลักษณะของผิวชั้นงาน

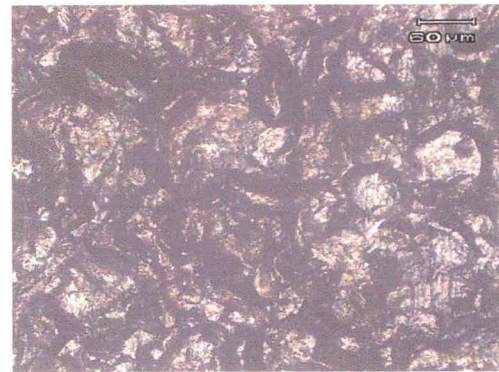
จากการตรวจสอบดูลักษณะของผิวชั้นงานไททาเนียม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical Light กำลังขยาย 500 เท่า ลักษณะของผิวชั้นงานที่ได้จากการทำผิวด้วยวิธีการ Milling มีลักษณะเป็นร่อง (Groove) เป็นรอยยาว ตลอดทั่วทั้งผิวของชั้นงาน (รูปที่ 13 a) และชั้นงานที่ผ่านการยิงทราย (Sand blasting) ลักษณะของผิวชั้นงานมีความราบเรียบมากกว่าชั้นงานที่ผ่านการทำ Milling (รูปที่ 13 b) ส่วนชั้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็ก (Shot peen) ผิวชั้นงานจะมีลักษณะที่เป็น Peak and Valley ซึ่งจะมีส่วนที่นูนและส่วนที่ลึกของผิวอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 13 c) และลักษณะผิวของชั้นงานที่ผ่านการยิงทรายและเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบไอกายภาพพบว่า ลักษณะของผิวชั้นงานเปลี่ยนแปลงอย่างมาก จากลักษณะของผิวที่มีความราบเรียบ เปลี่ยนแปลงเป็นผิวชั้นงานที่มีลักษณะเป็น Peak and Valley อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 13 d) ในขณะที่ผิวชั้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบด้วยกายภาพ (Shot peening + PVD Coating) ลักษณะผิวชั้นงานของผิวไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 13 e)



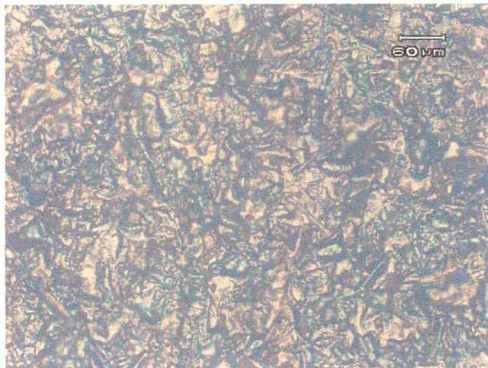
a) ผิวชิ้นงานจากการทำ Milling



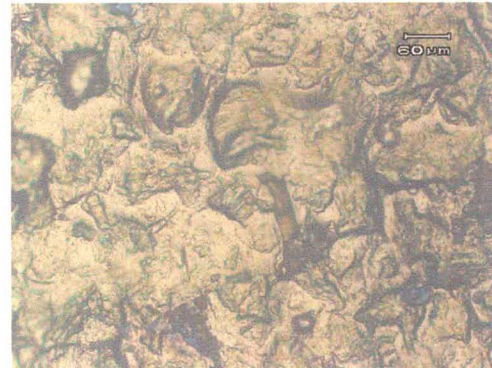
b) ผิวชิ้นงาน จากการยิงทราย Sand blasting



c) ผิวชิ้นงาน จากการยิงเม็ดเหล็ก Shot Peening



d) ผิวชิ้นงานจากการยิงทรายและเคลือบกายภาพ



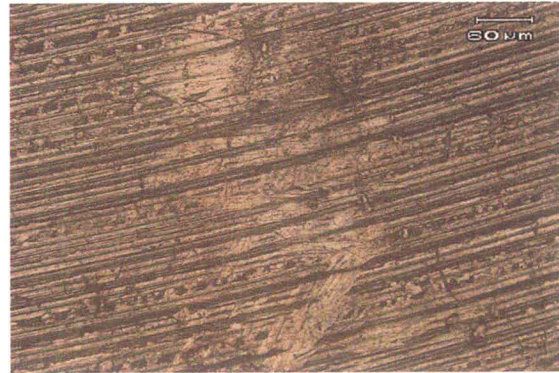
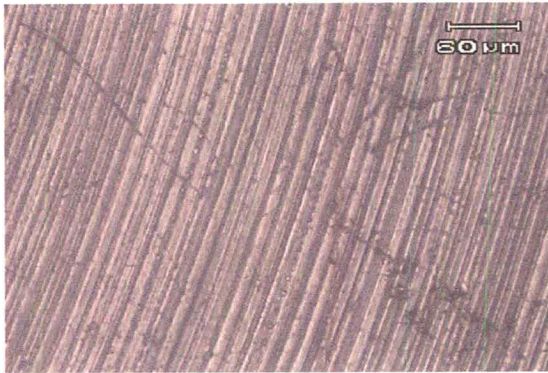
e) ผิวชิ้นงานจากการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบไอกายภาพ

รูปที่ 13 สัณฐานของผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ Wear Test

5.3 ลักษณะผิวชิ้นงานหลังจากทดสอบการสึกหรอภายใต้สภาวะแบบแห้ง

5.3.1 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทำ Milling

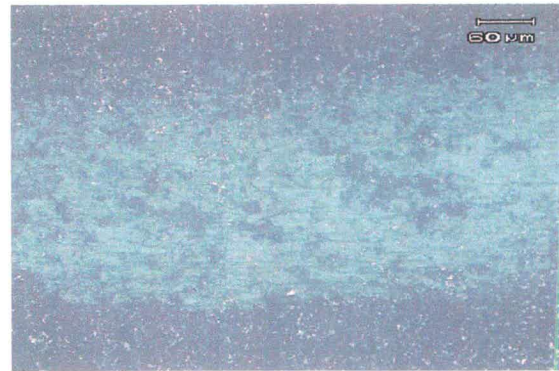
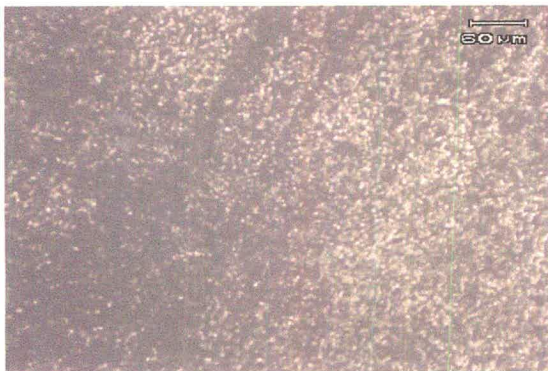
ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการทำ Milling เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ ในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 100,000 รอบ พบรอยแตกที่ผิวเป็นแนวยาวหลายแนว (รูปที่ 14 a) และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบเป็น 1,000,000 รอบ รอยแตกยังคงมีอยู่และบางบริเวณจะมีการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นงานและซีเมนต์กระดุก (รูปที่ 14 b)



a) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 100,000 รอบ b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ
รูปที่ 14 ลักษณะผิวชิ้นงาน Milling ที่ผ่านการทดสอบ Wear test ที่จำนวนรอบ a) 100,000 รอบ และ b) จำนวนรอบ 1,000,000 รอบ

5.3.2 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย (Sand Blasting)

ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย (Sand Blasting) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ ในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 100,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นงานและซีเมนต์กระดุกกระจายตัวลักษณะเป็นจุดเล็กๆอยู่ประปราย (รูปที่ 15 a) และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบเป็น 1,000,000 รอบ บริเวณที่เกิดการสึกหรอจะขยายตัวเป็นบริเวณกว้างขึ้น อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 15 b))



a) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 100,000 รอบ b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ
รูปที่ 15 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Sand blasting ที่ผ่านการทดสอบ Wear test ที่จำนวนรอบ a) 100,000 รอบ และ b) 1,000,000 รอบ

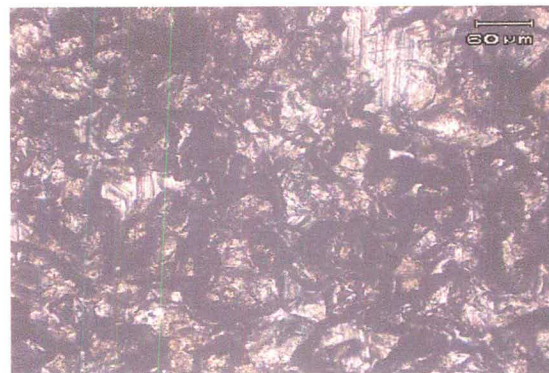
5.3.3 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการ Shot peening

ไม่พบลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็ก (Shot Peening) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ ในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device ที่จำนวนรอบในการทดสอบ 100,000 รอบ 500,000 รอบ และ 1,000,000 รอบ (รูปที่ 16 a), b) และ c)) อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาจากภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อยืนยันผลในระดับจุลภาคต่อไป



a) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 100,000 รอบ

b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 500,000 รอบ



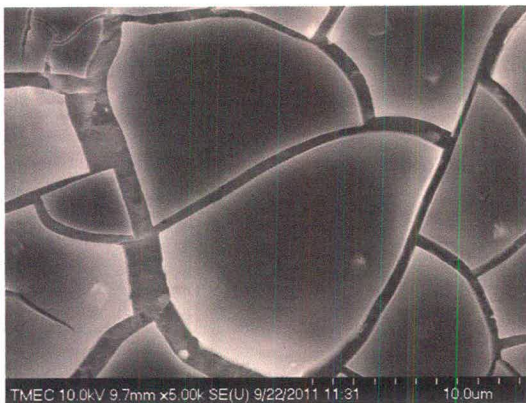
c) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

รูปที่ 16 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Shot Peening ที่ผ่านการทดสอบ Wear test ที่จำนวนรอบ

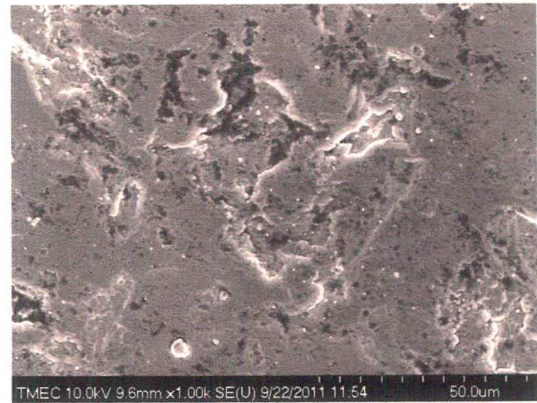
a) 100,000 รอบ และ b) จำนวนรอบ 500,000 รอบ และ c) 1,000,000 รอบ

5.3.4 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงทรายและเคลือบด้วยไอกายภาพ (Sand Blasting + PVD Coating)

ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงทรายและเคลือบด้วยไอกายภาพ (Sand Blasting + PVD Coating) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 100,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการกระเทาะ และผิวเคลือบล่อนออกจากผิวชิ้นงาน (Surface Delamination) ที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นงานและซีเมนต์กระดูกกระจายตัวบนผิวชิ้นงานโดยทั่ว ๆ ไป (รูปที่ 17 a)) และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบเป็น 500,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการสึกหรอมีลักษณะเป็นแบบ Abrasive Wear (รูปที่ 17 b) และเมื่อทดสอบชิ้นงานผ่าน 1,000,000 รอบ พบว่าบริเวณที่เกิดการสึกหรอเป็นแบบ Three Body Abrasive Wear อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยพบลักษณะของร่องเล็ก ๆ ยาว ๆ ระดับจุลภาค(รูปที่ 17 c))



a) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 100,000 รอบ



b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 500,000 รอบ



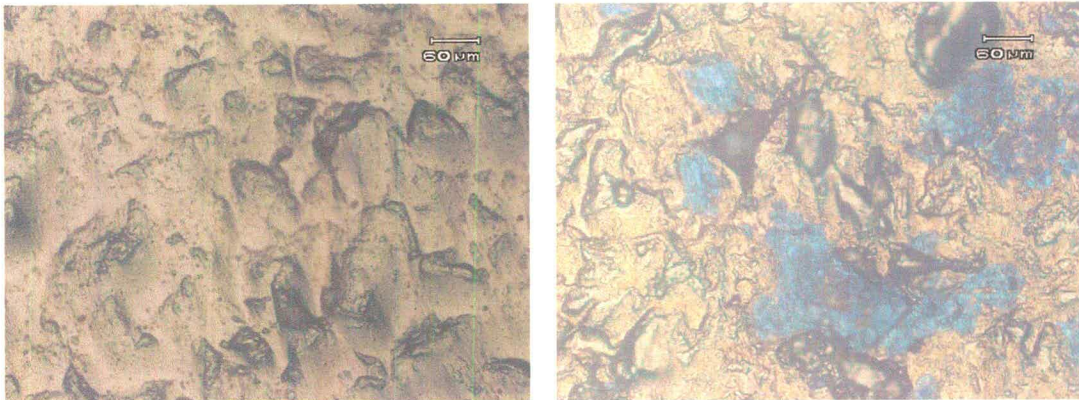
c) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

รูปที่ 17 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Sand Blasting + PVD Coating ที่ผ่านการทดสอบ Wear test ที่จำนวนรอบ a) 100,000 รอบ b) จำนวนรอบ 500,000 รอบ และ c) 1,000,000 รอบ

5.3.5 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบด้วยไอกายภาพ

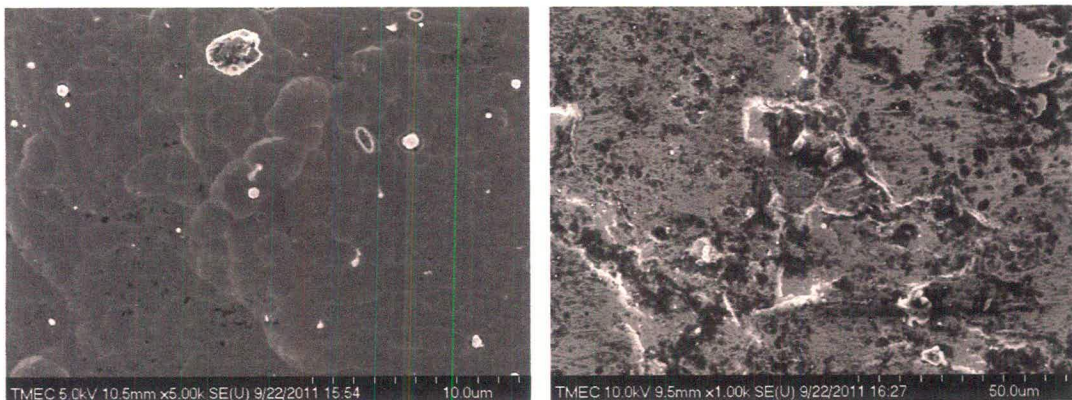
(Shot Peening + PVD Coating)

ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบด้วยไอกายภาพ (Shot Peening + PVD Coating) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 1,000,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) เปรียบเทียบกับผิวชิ้นงานตอนเริ่มการทดสอบ (รูปที่ 18 a) และ b)

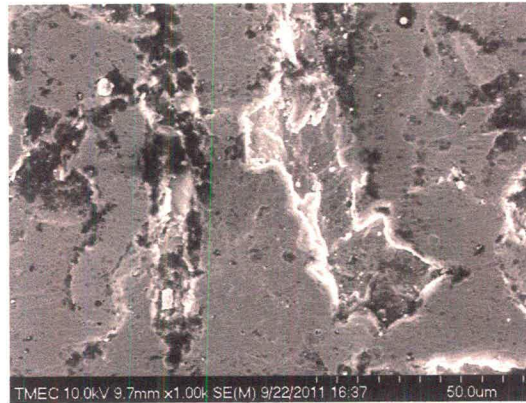


a) ผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ
รูปที่ 18 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Shot peening + PVD Coating ในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) a) ลักษณะของผิวก่อนการทดสอบ และ b) ลักษณะของผิวหลังการทดสอบ จำนวน 1,000,000 รอบ

เมื่อนำชิ้นงาน โดยเฉพาะในบริเวณที่เกิดความเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) มาตรวจสอบลักษณะการเสียหายของผิวในระดับจุลภาค (Microscopic Scale) พบว่า จากเดิมที่มีลักษณะของผิวเป็นแบบ Peak and Valley ที่มีระเบียบ (Deterministic Surface Morphology รูปที่ 19 a)) หลังจากผ่านการทดสอบ Wear Test จำนวน 500,000 รอบ พบว่าลักษณะของผิวถูกเสียดสีจนมีความเรียบผิวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 19 b)) และที่จำนวนรอบ 1,000,000 รอบ ลักษณะของผิวมีความเรียบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 19 c))



a) ผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 500,000 รอบ



c) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

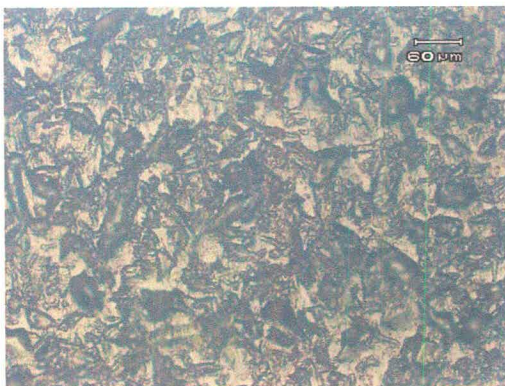
รูปที่ 19 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Shot Peening + PVD Coating ในระดับจุลภาค (Microscopic Scale) a) ก่อนการทดสอบ Wear test b) ชิ้นงานที่ผ่านจำนวนรอบ 500,000 รอบ และ c) ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

5.4 ลักษณะผิวชิ้นงานหลังจากทดสอบการสึกหรอภายใต้สภาวะแบบเปียก

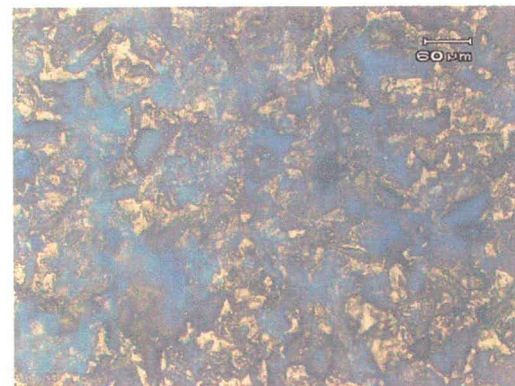
5.4.1 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงทรายและเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ

(Sand Blasting + PVD Coating)

ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงอนุภาคนาและเคลือบด้วยไอกายภาพ (Sand Blasting + PVD Coating) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device ภายใต้สภาวะแบบเปียก พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 1,000,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) กระจายตัวอยู่ทั่วไป เปรียบเทียบกับผิวชิ้นงานตอนเริ่มการทดสอบ (รูปที่ 20 a) และ b)



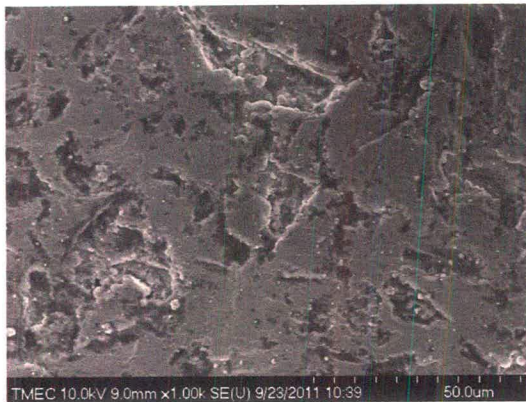
a) ผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ



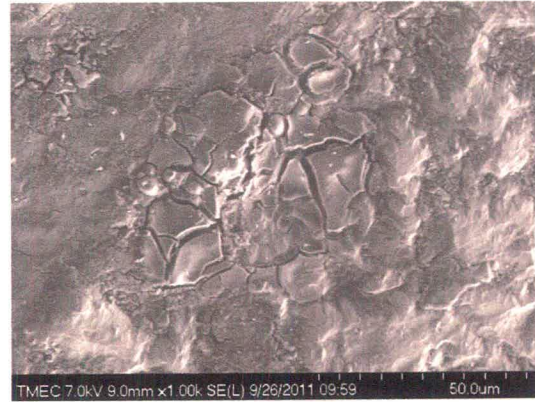
b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

รูปที่ 20 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Sand Blasting + PVD Coating ในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) a) ลักษณะของผิวก่อนการทดสอบ และ b) ลักษณะของผิวหลังการทดสอบ จำนวน 1,000,000 รอบ

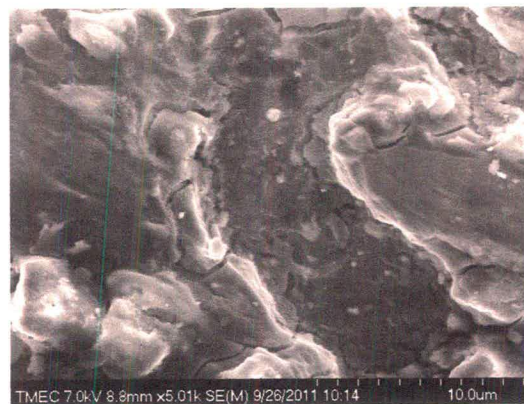
เมื่อนำชิ้นงาน โดยเฉพาะในบริเวณที่เกิดความเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) มาตรวจสอบลักษณะการเสียหายของผิวในระดับจุลภาค (Microscopic Scale) พบว่า ลักษณะความเรียบผิว จากเดิมที่มีลักษณะของผิวเป็นแบบ Peak and Valley ที่ไร้ระเบียบ (Deterministic Surface Morphology) หลังจากผ่านการทดสอบ Wear Test จำนวน 500,000 รอบ พบว่า ลักษณะของผิวถูกเสียดสีจนมีความเรียบผิวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 21 a)) และที่จำนวนรอบ 1,000,000 รอบ พบลักษณะความเสียหายของผิวที่เป็นรอยแตก และหลุดล่อนออกมาจากวัสดุพื้น (รูปที่ 21 b) และ c))



a) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 500,000 รอบ



b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

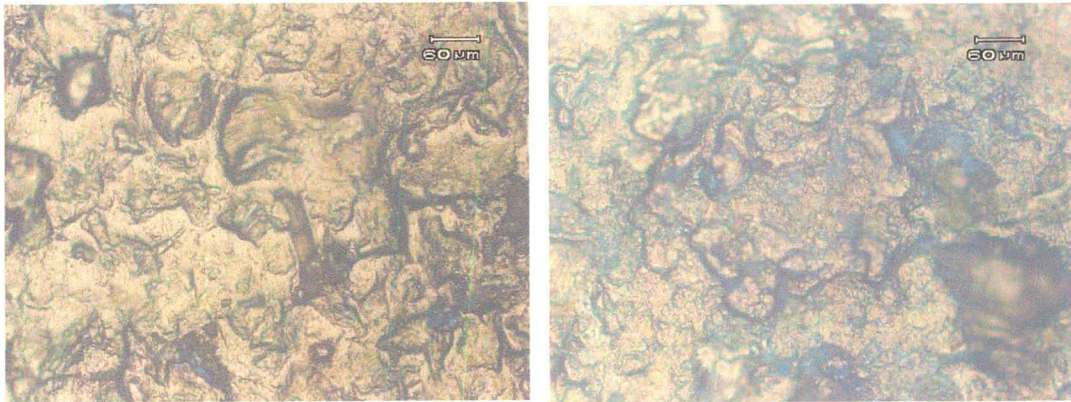


c) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

รูปที่ 21 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Sand Blasting + PVD Coating ในระดับจุลภาค (Microscopic Scale) a) หลังการทดสอบ Wear test 500,000 รอบ b) ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ และ c) ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

5.4.2 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (Shot Peening + PVD Coating)

ลักษณะการเสียหายของผิวชิ้นงานที่ผ่านการยิงเม็ดเหล็กและเคลือบด้วยไอกายภาพ (Shot Peening + PVD Coating) เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในเครื่องทดสอบ Wear Testing Device ภายใต้สภาวะแบบเปียก พบว่าที่จำนวนรอบในการทดสอบ 1,000,000 รอบ พบบริเวณที่เกิดการเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) กระจายตัวอยู่ทั่วไป เปรียบเทียบกับผิวชิ้นงานก่อนเริ่มการทดสอบ (รูปที่ 22 a) และ b))

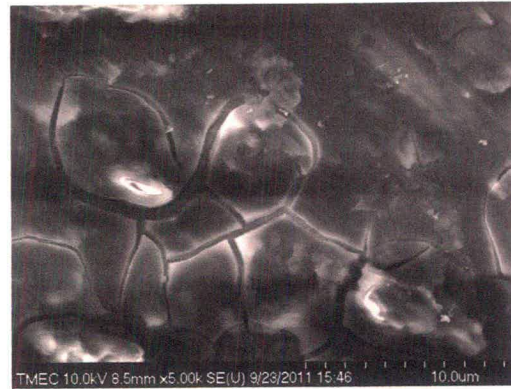


a) ผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ

b) ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ 1,000,000 รอบ

รูปที่ 22 ลักษณะผิวชิ้นงานของ Shot Peening + PVD Coating ในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) a) ลักษณะของผิวก่อนการทดสอบ และ b) ลักษณะของผิวหลังการทดสอบ จำนวน 1,000,000 รอบ

เมื่อนำชิ้นงาน โดยเฉพาะในบริเวณที่เกิดความเสียหายในระดับมหภาค (Macroscopic Scale) มาตรวจสอบลักษณะการเสียหายของผิวในระดับจุลภาค (Microscopic Scale) พบว่าลักษณะความเรียบผิว จากเดิมที่มีลักษณะของผิวเป็นแบบ Peak and Valley ที่ไว้ระเบียบ (Deterministic Surface Morphology) หลังจากผ่านการทดสอบ Wear Test จำนวน 1,000,000 รอบ พบว่าลักษณะของผิวจะถูกเสียดสีจนมีความเรียบผิวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 23 a)) และ ลักษณะความเสียหายที่ผิวพบทั้ง ความเสียหายแบบ Three Body Abrasive Wear (รูปที่ 23 a)) และลักษณะความเสียหายของผิวที่เป็นรอยแตก และหลุดล่อนออกมาจากวัสดุพื้น (Surface Delamination) (รูปที่ 23 b))



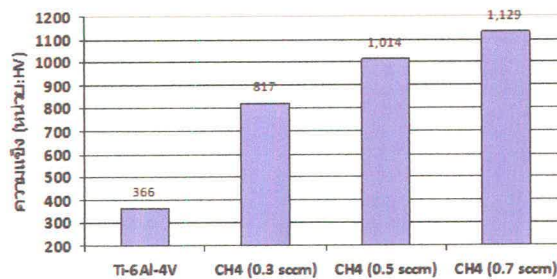
a) ผิวชิ้นงานเกิด Three Body Abrasive Wear b) ผิวชิ้นงานเสียหายแบบ Surface Delamination

รูปที่ 23 ลักษณะการเสียหายผิวชิ้นงานของ Shot Peening + PVD Coating หลังการทดสอบ จำนวน 1,000,000 รอบ

5.5 ผลการทดสอบการสึกหรอของการเคลือบผิว

5.5.1 ผลการทดสอบความแข็ง

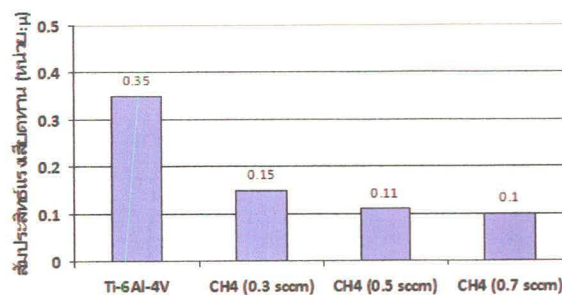
ผลการทดสอบการวัดความแข็งของผิวชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวและไม่มีการเคลือบผิว แสดงในรูปที่ 24 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความแข็งต่ำสุด และชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบชิ้นงานด้วยก๊าซมีเทนอัตราการใช้ 0.7 sccm มีค่าความแข็งสูงที่สุด



รูปที่ 24 ค่าความแข็งชิ้นงานก่อนและหลังเคลือบ

5.5.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

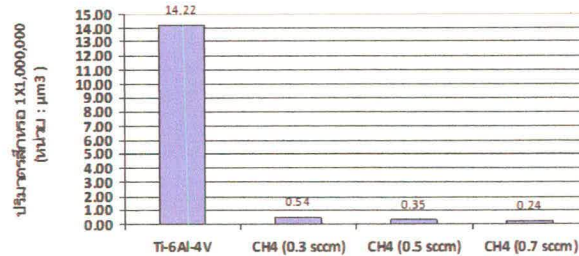
ผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวและไม่มีการเคลือบผิว พบว่า ปริมาณอัตราการใช้ของ CH₄ (0.7 sccm) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยที่สุดและ Ti-6Al-4V มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากที่สุด แสดงในรูปที่ 25



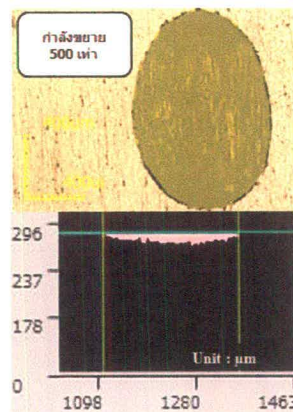
รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

5.5.3 ผลการหาปริมาตรการสึกหรอ

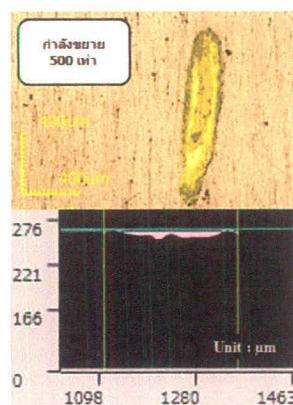
ผลการทดสอบปริมาตรการสึกหรอ แสดงในรูปที่ 26 จาการอยการสึกหรอ (Wear scars) ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบ พบว่าปริมาตรการสึกหรอ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบมีมากที่สุด ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอัตราการใช้ของ ก๊าซมีเทน 0.7 sccm น้อยที่สุด แสดงในรูปที่ 27-30



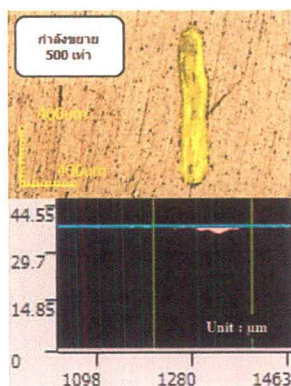
รูปที่ 26 ปริมาตรการสึกหรอ (หน่วย: μm^3 ต่อระยะทาง 165 เมตร)



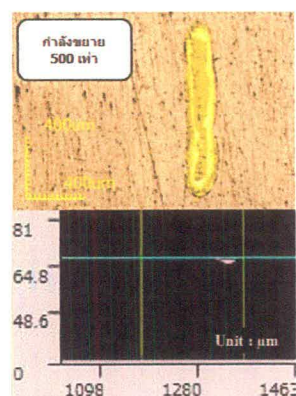
รูปที่ 27 Wear scar ของผิวชิ้นงาน Ti-6Al-4V



รูปที่ 28 Wear scar ของผิวชิ้นงานที่เคลือบด้วยอัตราการใช้ของก๊าซ CH_4 0.3 sccm



รูปที่ 29 Wear scar ของผิวชิ้นงานที่เคลือบด้วยอัตราการไหลของก๊าซ CH_4 0.5 sccm



รูปที่ 30 Wear scar ของผิวชิ้นงานที่เคลือบด้วยอัตราการไหลของก๊าซ CH_4 0.7 sccm

5.6 ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพต่อเซลล์สิ่งมีชีวิต แสดงในตารางที่ 10 พบว่าชิ้นงาน Ti-6Al-4V ทั้งก่อนเคลือบและหลังที่เคลือบผิวด้วย $\text{TiAlVC}_x\text{N}_y$ ด้วยอัตราการไหลของก๊าซ CH_4 (0.3 sccm) อัตราการไหลของก๊าซ CH_4 (0.5 sccm) และอัตราการไหลของก๊าซ CH_4 (0.7 sccm) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายเนื่องจาก อัตราการรอดชีวิตของเซลล์ (% Viability) สูงกว่า 70 % (Cytotoxicity)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความเป็นพิษบนชิ้นงาน (หน่วย: % Viability)

Sample	% Viability
Blank	100
Negative control	94.2
Positive control	2.8
Ti-6Al-4V	84.0
CH_4 (0.3 sccm)	87.9
CH_4 (0.5 sccm)	85.2
CH_4 (0.7 sccm)	84.7

6. วิจัยผลกระทบการทดลอง

6.1 การปรับปรุงผิวด้วยวิธีการทางกล (Mechanical Surface Treatment)

การทดลองนี้มีการปรับปรุงผิว 2 วิธีด้วยวิธีการทางกลคือ การปรับปรุงผิวด้วยวิธีการกลึง milling และการปรับปรุงผิวด้วยวิธีการยิงทราย (sand blasting) ด้วยวัสดุที่นำมายิงทรายชนิดต่าง ๆ

ลักษณะการกลึงผิวด้วยวิธีการ milling ลักษณะของผิวมีลักษณะเป็นร่องยาวตลอดทั่วทั้งผิวของชิ้นงาน เนื่องจากการทำ milling จะทำให้ความเค้นตกค้างที่บริเวณใต้ผิวเป็นความเค้นตกค้างแบบดึง (Tensile residual stress) มีผลทำให้การต้านทานความล้า (Fatigue resistance) และการต้านทานการสึกหรอที่มีภาวะแบบสลัด (Fretting fatigue resistance) ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเช่นกัน [2] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 13 ที่มีรอยแตกที่ผิวชิ้นงานเป็นบริเวณกว้าง รอยแตกที่เกิดขึ้นนี้สามารถพัฒนาการไปเป็นผองอนุภาคขนาดระดับไมครอน ที่สามารถทำให้เกิดการสึกหรออย่างรุนแรง เนื่องมาจากกลไก Three Body Abrasive Wear ได้เช่นกัน

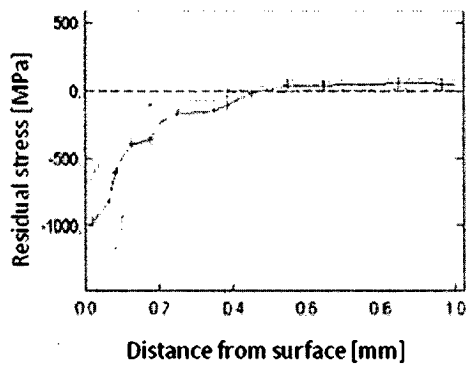
ดังนั้น ในขั้นตอนการผลิตชิ้นงานไททาเนียมจากขั้นตอนการผลิตด้วยวิธีการ milling เพียงอย่างเดียวอาจส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุฝังในมีอายุสั้นลง

ลักษณะผิวของการยิงทราย สัณฐานของผิวชิ้นงานไททาเนียมแบ่งได้เป็นสองกลุ่มตามลักษณะรูปทรงของอนุภาคที่นำมาใช้ยิงคือ อนุภาคอลูมินา (ยิงด้วยทรายอลูมินา (Al_2O_3) และอนุภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

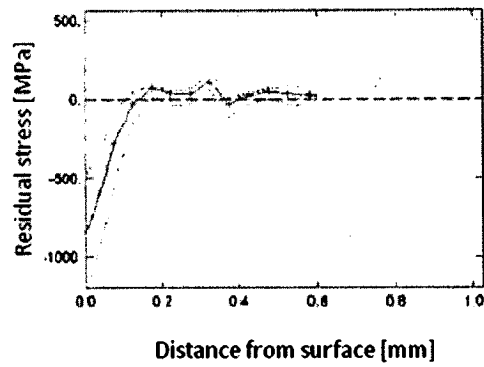
การปรับปรุงผิวด้วยการยิงทรายด้วยอนุภาคต่าง ๆ ทำให้เกิด Plastic Deformation ที่บริเวณผิว และส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างแบบกด (Compressive Residual Stress) ซึ่งขนาดของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับมวล และสมบัติทางกลของอนุภาคที่นำมาใช้ยิง [3]

รูปที่ 31 แสดงการกระจายตัวของความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของชิ้นงานไททาเนียมที่เกิดจากการยิงทราย เปรียบเทียบระหว่างการยิงด้วยผงอลูมินาขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 ไมครอน และผงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเฉลี่ย 400 ไมครอน การวัดค่าความเค้นตกค้างวัดด้วยวิธี Hole-Drilling Method [7,8] เส้นทึบแสดงถึงค่าที่ได้จากการวัด เส้นประแสดงถึงค่าความน่าเชื่อถือทางสถิติ 90%

จากภาพค่าความเค้นตกค้างสูงสุดของการยิงผิวชิ้นงานด้วยผงเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าความเค้นตกค้างที่ผิวสูงสุดคือ -1,000 MPa และความลึกของชั้นผิวภายใต้ความเค้นตกค้างแบบกดคือ 500 ไมครอน ในขณะที่ค่าความเค้นตกค้างของการยิงผิวชิ้นงานด้วยผงอลูมินามีค่าความเค้นตกค้างสูงสุดต่ำกว่าคือ - 800 MPa และความลึกของชั้นผิวภายใต้ความเค้นตกค้างคือ 180 ไมครอน



a) Blasting with stainless steel ball

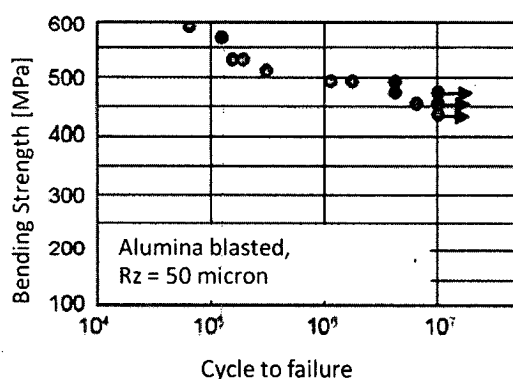


b) Blasting with Alumina

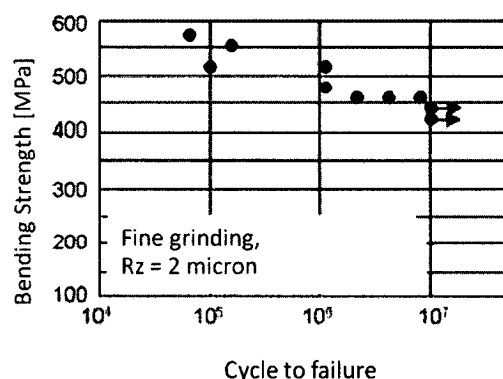
รูปที่ 31 ภาพการกระจายตัวของความเค้นตกค้าง a) จากการยิงด้วยผงเหล็ก
b) ยิงด้วยผงอลูมินา [7,8]

ค่าความเค้นตกค้างสูงสุดของการยิงผิวด้วยผงอลูมินาและความหนาของชั้นผิว ภายใต้ความเค้นตกค้างที่ลดลง เป็นผลมาจากในการยิงด้วยผงอลูมินาพลังงานบางส่วนของอลูมินา ได้สูญเสียไปจากการชนของอนุภาคอลูมินาและการแตกของอนุภาคอลูมินา ซึ่งการแตกของอนุภาคอลูมินาสามารถเห็นได้ในรูปของ Particle Contamination (รูปที่ 2 และ รูปที่ 3) นอกจากนี้การยิงอนุภาคอลูมินาจนทำให้ผิวชิ้นงานมีรอยแตกเกิดขึ้น บริเวณที่เกิดรอยแตกไม่เกิดความเค้นตกค้างแบบกดได้

ในงานวิจัยของ Heinrich พบว่า การยิงทรายด้วยอนุภาคอลูมินาไม่ได้ทำให้ชิ้นงาน มีค่า Bending Fatigue Strength สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวด้วยวิธี Grinding ซึ่งค่า Bending Fatigue Strength เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าความเค้นตกค้างแบบ กดในชิ้นงานได้เช่นกัน ในรูปที่ 32 [9]



a) Alumina blasted



b) Fine grinding

รูปที่ 32 ภาพ S-N curve ตามการทดลองของ Heinrich a) การทดลองกับชิ้นงานที่ยิงด้วยอลูมินา b) การทดลองกับชิ้นงานที่ขัดผิวละเอียด [9]

ข้อดีของการยิงทรายทำให้ค่าความเรียบผิวเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงของชั้นผิวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Dislocation, Microhardness) และเพิ่มค่าความเค้นตกค้างแบบกด (Compressive Residual Stress) แต่การยิงทรายก็ทำให้เกิดผลเสียในกรณีที่เกิดรอยแตก (Surface crack) และการตกค้างของอนุภาคบนผิวชิ้นงาน (Particle contamination) ได้เช่นกัน

การแตกหักของวัสดุฝังในสโปกเทียมขึ้นอยู่กับสองปัจจัย เมื่อพิจารณาในประเด็นการวิเคราะห์ความเสียหาย (Failure Analysis) คือ ปัจจัยการเกิดรอยแตก (Crack Initiation) และปัจจัยที่ทำให้รอยแตกขยายตัว (Crack Propagation) เนื่องมาจากความล้า (Fatigue) โดยที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยและเงื่อนไขของผิวชิ้นงานดังนี้คือ ค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) ค่าความแข็งแรงของชั้นผิว (Strain Hardening) และการกระจายตัวของความเค้นตกค้างใต้ผิว (Residual Stress Distribution) โดยที่ปัจจัยทั้งสามอย่าง ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการยิงทราย คือ วัสดุที่ใช้ยิงทราย ขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่ใช้ในการยิงทราย เพราะการยิงทรายด้วยอลูมินาทำให้เกิด Notch Effect ที่มีสาเหตุมาจากความเรียบผิวที่เพิ่มขึ้น และรอยแตกที่เกิดจากการยิงอลูมินาเป็นการสนับสนุนการเกิดรอยแตกที่ผิว [10,11]

6.2 การปรับปรุงผิวด้วยวิธีการเคลือบผิว (Chemical Surface Treatment)

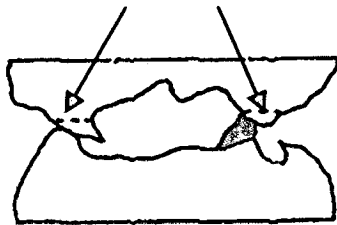
วิธีการปรับปรุงผิวด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพแบบ DC unbalance magnetron sputtering โดยใช้สภาวะการเคลือบผิวที่ใช้ปริมาณก๊าซอาร์กอน และไนโตรเจนคงที่ ส่วนปริมาณการไหลของก๊าซมีเทน (CH_4) ที่อัตราการไหล 0.3, 0.5 และ 0.7 sccm โดยผลการวิจัยนี้อัตราการไหลของก๊าซมีเทนมีผลต่อ ค่าความแข็ง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยพบว่าความหนาของชั้นผิวเคลือบมีความหนาใกล้เคียงกัน (0.5- 0.7 ไมครอน) ที่อัตราการไหลของก๊าซมีเทน 0.7 sccm มีค่าความเรียบผิวสูงสุด และมีสมบัติทางไดรโบลอย์ ดีที่สุด คือค่าความแข็งสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสึกหรอต่ำที่สุด นอกจากนี้การเคลือบผิวด้วยวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุฝังในประเภทสโปกเทียมได้ เพราะสามารถเข้ากันได้กับเซลล์สิ่งมีชีวิต แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบในระดับ Clinical test ก็มีความจำเป็นในการยืนยันผลการทดลองนี้ เนื่องจากอนุภาคโลหะขนาดเล็ก (Metallic wear particle) อันเนื่องมาจากการสึกหรอจะมีกลไกทางชีววิทยาต่างจาก กลไกทางชีววิทยาของพื้นผิวโลหะที่มีบริเวณกว้าง เช่นพื้นผิวของวัสดุฝังในในร่างกายมนุษย์ [12,13]

6.3 กลไกการเกิด Abrasive Wear ของผิวโลหะ

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิด Abrasive wear คือ ค่าความเรียบผิวของพื้นผิวสัมผัส (Rz) ที่เสียดสีกัน และขนาดของแรงกดที่กระทำลงบนผิวสัมผัส (Normal Force) ภายใต้การเคลื่อนที่ของผิวคู่สัมผัส แรงเฉือน (Shear force) ที่กระทำบน ยอดของความเรียบผิว (roughness tip) จะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น (รูปที่ 31) และเมื่อคู่ผิวสัมผัสเคลื่อนที่ไปมา จะนำไปสู่การแตกที่พื้นที่ได้ผิวจุดยอดความเรียบผิว และเมื่อรอยแตกขยายตัวทำให้อยอดของความเรียบผิวแตกหักออกไป กลายเป็นอนุภาคโลหะ (Abrasive wear particle) ในกรณีผิวของวัสดุฝังในที่ผ่านการยิงทรายมา ค่าความเรียบผิวสูง อนุภาคโลหะสามารถตกลงไปในช่องว่างของผิวสัมผัส

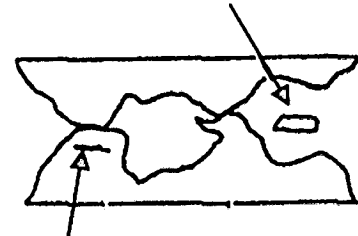
ได้ ความน่าจะเป็นในการเกิด การเสียดสีอย่างรุนแรง อันเนื่องมาจาก Three body abrasive wear จึงค่อนข้างยาก เปรียบเทียบกับผิวของวัสดุฝังในที่ผ่านการขัดผิว จนมีความเรียบผิวดำ โอกาสที่ อนุภาคโลหะจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวคู่สัมผัสจึงเป็นไปได้สูงกว่า

Maximum shear stress



a) การเสียดสีผิวคู่สัมผัสที่บริเวณยอดของความเรียบผิว

Abrasive wear particle



Subsurface crack

b) การเกิดรอยแตก และการเกิดอนุภาคโลหะจากยอดความเรียบผิว

รูปที่ 33 กลไกการเกิดรอยแตกและการเกิดอนุภาคจากการเสียดสี

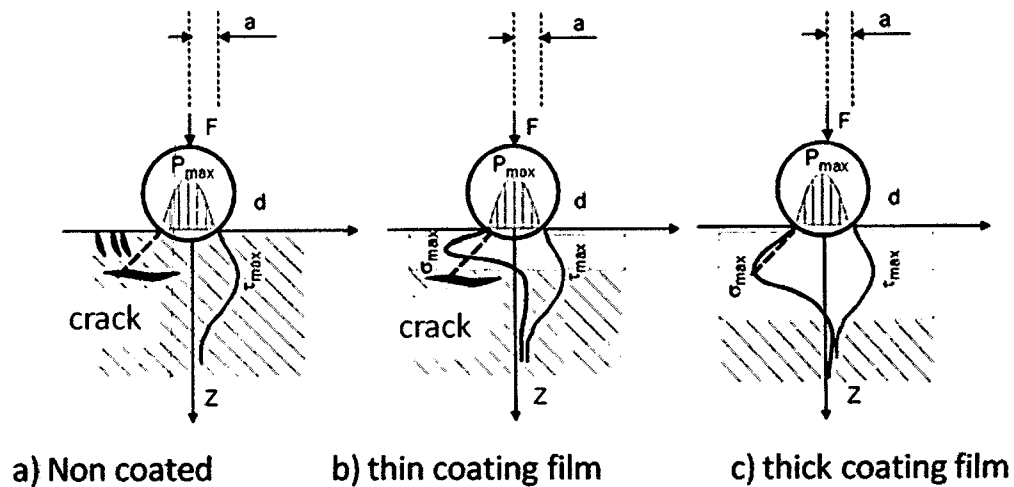
โดยทั่วไปอัตราการเกิดอนุภาคโลหะ ขึ้นอยู่กับค่าความเรียบผิว (R_z) ของวัสดุฝังใน [1] ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานสูง อัตราการเกิดอนุภาคโลหะ (Abrasive wear particle) จะสูงตาม ในการลดอัตราการเกิดอนุภาคโลหะจึงจำเป็นที่จะต้องลดความเรียบผิวของชิ้นงานลง

การเกิดปรากฏการณ์รอยแยกของผิวเคลือบ (Surface Delamination) ภายใต้การทดสอบแบบสภาวะแห้ง (รูปที่ 17 a), และภายใต้การทดสอบสภาวะเปียก (รูปที่ 21 b) สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีแรงดันผิวสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertzian Contact Theory) เนื่องจากผิวสัมผัสอยู่ภายใต้แรงกด (Normal force) และแรงเฉือน (Shear Force) ทำให้เกิดรอยแตกบริเวณใต้ผิวที่จุด สูงสุดของ maximum shear force ในรูปที่ 34 a) รอยแตกนี้จะขยายตัวในทิศทางขึ้นสู่พื้นผิวและทำมุม 45° ของทิศทาง Normal force ซึ่งการเกิดขึ้นของรอยแตกนี้ คือสภาวะ ความล้าที่เกิดจากการเสียดสีของผิว (Fretting Fatigue)

ในกรณีที่มีการเคลือบผิว ซึ่งชั้นของการเคลือบผิวมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า บริเวณที่เกิดจุดสูงสุดของแรงเฉือน (Maximum shear force) จะไม่สามารถป้องกันรอยแตกที่จะเกิดจากความล้าได้ผิวได้ จะทำให้เกิดการหลุดร่อน (Subsurface crack and surface delamination) ของผิวเคลือบอันเนื่องมาจากเคลือบด้วยความหนาที่ไม่เหมาะสมกับสภาวะแรงที่กระทำ (รูปที่ 34 b)

ในกรณีที่มีการเคลือบผิว ซึ่งชั้นของผิวเคลือบผิวหนากว่า บริเวณที่เกิดจุดสูงสุดของแรงเฉือน (Maximum shear force) ความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยแตกได้ผิวจะสูงกว่า อายุการใช้งานและอัตราการเกิดอนุภาคโลหะ (Abrasive wear particle) จะต่ำกว่า (รูปที่ 34 c)

จากทฤษฎีของเฮิร์ตซ์สามารถไปประยุกต์การเคลือบผิว โดยเคลือบให้ความหนาของชั้นผิวมีความสอดคล้องกับสภาวะของแรงกดและแรงเฉือนได้



$\tau_{\max}$: maximal shear stress

$P_{\max}$: maximal Hertzian Pressure

a : contact length particle/surface

d : particle diameter

E_1, E_2 : Elastic modulus of particle, metal

ν : Poisson's number

$Z_{\max}$: position of maximal shear stress

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot (1 - \nu^2) \cdot d}{4 \cdot E}}$$

$$E = 2 \cdot \left[\frac{1 - \nu^2}{E_1} + \frac{1 - \nu^2}{E_2} \right]^{-1}$$

$$\tau_{\max} = 0.31 \cdot P_{\max}$$

$$Z(\tau_{\max}) = 0.47 \cdot a$$

รูปที่ 34 ทฤษฎีผิวคู่สัมผัสของเฮิร์ตซ์ a) กรณีชิ้นงานไม่ผ่านการเคลือบผิว

b) กรณีชิ้นงานเคลือบผิวด้วยผิวเคลือบบาง c) กรณีชิ้นงานเคลือบผิวด้วยผิวเคลือบหนา