



อิทธิพลโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการลากขึ้นรูป

THE INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
STAINLESS STEEL SHEET IN DEEP DRAWING PROCESS

ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

อิทธิพลโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการลากขึ้นรูป



ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
STAINLESS STEEL SHEET IN DEEP DRAWING PROCESS



NATCHANUN ANGSUSERANEE

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการลากขึ้นรูป

ของ

ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล) (รองศาสตราจารย์ ดร.บพิตร บุญผไท)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง) (อาจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์)

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการลากขึ้นรูป
ผู้วิจัย	ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง

การขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยทั่วไปนิยมใช้สารหล่อลื่นปรับปรุงสมบัติทางไดรบอลิยระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน แต่สารหล่อลื่นมักเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งานจึงทำให้มีความต้องการลดปริมาณการใช้สารหล่อลื่นในการขึ้นรูปโลหะแผ่น คุชฌ์นิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA ความหนา 0.20 mm และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการลากขึ้นรูปที่มีผลต่อพฤติกรรมของการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงานและพฤติกรรมทางไดรบอลิยระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น พิล์ม DLC, CrN, TiN, TiCN และ TiAlN ถูกเคลือบด้วยกระบวนการ PVD บนผิวแม่พิมพ์ทำจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ชุบแข็ง เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไดรบอลิยแทนการใช้สารหล่อลื่น กล้องจุลทรรศน์และเทคนิค Optical Emission Spectroscopy ถูกใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางเคมีของวัสดุชิ้นงาน สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานได้จากการทดสอบด้วยแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 การหาสมบัติทางไดรบอลิยระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานใช้การจำลองการทดสอบด้วยไดรบอลิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a พฤติกรรมของการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงานถูกศึกษาด้วยแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่มีตัวแปรของกระบวนการแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าวัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 711 MPa และมีร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 62 วัสดุชิ้นงานมีขีดจำกัดการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.9 เมื่อใช้ขนาดรัศมีของมุมตายเท่ากับ 2.5 mm ขนาดองศาของมุมพื้นที่เท่ากับ 30° และแรงจับยึดแผ่นชิ้นงานขนาด 8 kN การเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุชิ้นงานส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลวัสดุชิ้นงานเปลี่ยนแปลง สภาพทางไดรบอลิยมีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน พบปัญหาการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุแม่พิมพ์ ความดันสัมผัสระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานและความเร็วการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุแม่พิมพ์ พิล์ม DLC มีสมบัติทางไดรบอลิยดีที่สุดเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA จึงเหมาะสมใช้เคลือบผิวแม่พิมพ์วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ชุบแข็ง เพื่อป้องกันการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

คำสำคัญ : การลากขึ้นรูป, เหล็กกล้าไร้สนิม, ไดรบอลิย, ยึดติด, การเคลือบฟิล์ม

Title	THE INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL SHEET IN DEEP DRAWING PROCESS
Author	NATCHANUN ANGSUSERANEE
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Pracha Bunyawanchakul , Ph.D.
Co Advisor	Dr. Bhadpiroon Watcharasresomroeng

Sheet metal forming generally uses lubrication to improve the tribological properties between the contacting surface of die and workpiece material. However, lubricants are often hazardous to both the environment and the users, reducing the amount of lubricant used in sheet metal forming. This thesis aims to study the microstructure and mechanical properties of SUS304 BA stainless steel grade, with a thickness of 0.20 mm, and to determine the relationship of the deep drawing variable and the forming behavior of the material. The workpiece and tribological behavior between the contacting surface of the die material and the workpiece material in dry conditions. DLC, CrN, TiN, TiCN and TiAlN films are PVD coated on die surface, made from hardened SKD 11 cold work tool steel materials to improve the tribological properties, instead of lubricants. Microscopy and Optical Emission Spectroscopy were used to investigate the microstructure and chemical properties of the workpiece materials. The mechanical properties of the workpiece material were obtained by tensile testing in accordance with ASTM E8 standards. The determination of tribological properties between the contact surface of the die material and the workpiece material was performed using simulation testing with a tribometer, according to the ASTM G99-95a standard. The forming behavior of the workpiece material was studied with a deep drawing die with different process parameters. The study found that the workpiece material was stainless steel with an austenite structure. The tensile strength was 711 MPa and a percentage elongation of 62. The workpiece has a limiting drawing ratio of 1.9 when using a die radius of 2.5 mm, a punch angle of 30° and a blank holder force of 8 kN. The plastic deformation of the workpiece material changed its microstructure and mechanical properties. The tribological conditions influenced the deep drawing ability of workpiece material. There were adhesion problems of the workpiece material on the die surface. The contact pressure between the surface of the die material, the workpiece material, and sliding velocity were positively related to adhesion of the workpiece material on the die surface. DLC film has the best tribological properties when relatively slid with SUS304 BA stainless steel grade. Therefore, it is suitable for die surface coating on hardened SKD11 cold work tool steel grade, to prevent adhesion of the SUS304 BA stainless steel grade.

Keyword : Deep drawing, Stainless steel, Tribology, Adhesion, Film coating

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวนิชกุล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ อาจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDM) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ได้ให้ความรู้ ความคิด คำแนะนำในการทำงานวิจัย รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บพิตร นุปผโชติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประธานควบคุมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรรมการควบคุมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลามาทำการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบ แนะนำ แก้ไข ให้วิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณ คุณเกรียงไกร บุญน่วม หัวหน้าส่วนฝ่ายผลิต บริษัท ไทยซัมมิท โกลด์เพรส จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้าพเจ้าได้เก็บข้อมูลจากทางบริษัท เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองและเปรียบเทียบผลการศึกษา ขอขอบคุณ ดร.สมคิด เลานิตทะรากุล ผู้จัดการทั่วไป บริษัท เออีเอสซี จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขอขอบคุณ ดร.เจษฎา จันทร์ผา สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ช่วยประสานงานนำชิ้นทดสอบและชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ขอขอบคุณ คุณจ่านง ขาวยศ และ คุณจิรวัฒน์ ขาวยศ สาขาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ช่วยสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณแม่ของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา และขอบคุณผู้เกี่ยวข้องในผลงานของข้าพเจ้าทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม

ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การขึ้นรูปโลหะ	6
2.2 การหาสมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานโดยการทดสอบด้วยแรงดึง	15
2.3 อิทธิพลของสมบัติวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรต่อการลากขึ้นรูป	19
2.4 ไตรบอโลยี (Tribology) ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	21
2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม	28
2.6 งานวิจัยเกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	35
3.1 การดำเนินงานวิจัย	35
3.2 เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และระเบียบวิธีวิจัย	36

บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผล	55
4.1 สมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์	55
4.2 โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางเคมีของวัสดุขึ้นงานและวัสดุทำแม่พิมพ์	58
4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง	59
4.4 พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์	63
4.5 พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับฟิล์มแข็ง	71
4.6 พฤติกรรมการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA	87
4.7 ประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA	92
4.8 การทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีด้วยเงื่อนไขภายใต้ตัวแปรกระบวนการลากขึ้นรูป	98
4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุขึ้นงานหลังการขึ้นรูป	102
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	104
5.1 สรุปผลการวิจัย	104
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	105
5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย	106
บรรณานุกรม	107
ภาคผนวก	113
ภาคผนวก ก แบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง	114
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบวัสดุขึ้นงานด้วยแรงดึง	132
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมี	134
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของฟิล์มแข็ง	138
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบ Ball-on-Disk	141
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน	197
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบทางสถิติ	208

ประวัติผู้เขียน.....	211
----------------------	-----



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สูตรคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนขึ้นรูป.....	9
ตาราง 2 ขนาดขึ้นทดสอบแรงดึงแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมถูกเตรียมจากโลหะแผ่น.....	16
ตาราง 3 รูปร่างและความหนาของชิ้นงานทดสอบ.....	36
ตาราง 4 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามรูปแบบ No. 13 B.....	38
ตาราง 5 เงื่อนไขการทดสอบสมบัติทางไทรบอลอยี่ระหว่างผิวคู่สัมผัส.....	43
ตาราง 6 ตัวแปรและค่าของตัวแปรในการทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	49
ตาราง 7 เงื่อนไขของการทดสอบการขีดข่วน.....	52
ตาราง 8 สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน SUS304 BA.....	57
ตาราง 9 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงานและวัสดุทำแม่พิมพ์.....	58
ตาราง 10 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง.....	61
ตาราง 11 ผลการศึกษารูปแบบความเสียหายของวัสดุทำแม่พิมพ์.....	64
ตาราง 12 ผลการศึกษารูปแบบความเสียหายฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง.....	75
ตาราง 13 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูปที่มีต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน.....	90
ตาราง 14 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งในการลากขึ้นรูป.....	92
ตาราง 15 เงื่อนไขสภาพทางไทรบอลอยี่ในการทดสอบลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน.....	93

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ชิ้นงานที่เกิดรอยครูดเนื่องจากการยึดติดบนผิวตาย	2
ภาพประกอบ 2 (ก) ชิ้นงานกรณีศึกษา (ข) ชิ้นงานทดลองลากขึ้นรูป	3
ภาพประกอบ 3 เปรียบเทียบการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ [6]	6
ภาพประกอบ 4 เครื่องมือสำหรับการลากขึ้นรูป	8
ภาพประกอบ 5 ลักษณะของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป	8
ภาพประกอบ 6 ชิ้นงานถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูป	13
ภาพประกอบ 7 ลักษณะขึ้นทดสอบแรงดึง	15
ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง	19
ภาพประกอบ 9 การตัดขึ้นทดสอบแรงดึงในแต่ละทิศทางการรีด	20
ภาพประกอบ 10 ความไม่เสมอกันของขอบชิ้นงานลากขึ้นรูป	21
ภาพประกอบ 11 ความเสียดทาน	22
ภาพประกอบ 12 การสึกหรอบแบบเชื่อมติด	23
ภาพประกอบ 13 การเกิดการสึกหรอบแบบขัดถู	24
ภาพประกอบ 14 สมบัติที่ต้องการในการเคลือบฟิล์มแข็ง	27
ภาพประกอบ 15 เครื่องไวร์ อีดีเอ็ม	38
ภาพประกอบ 16 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์	39
ภาพประกอบ 17 เครื่องวัดความแข็ง	39
ภาพประกอบ 18 เครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	40
ภาพประกอบ 19 ชุดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
ภาพประกอบ 20 เครื่องไทรบอมิเตอร์	42

ภาพประกอบ 21 รายละเอียดการแสดงผลของซอฟต์แวร์ InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10	43
ภาพประกอบ 22 บอลและแผ่นจานที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมด้านไทรบอโลยี	44
ภาพประกอบ 23 ชุดวัดรอยสึกหรอของบอล.....	45
ภาพประกอบ 24 ลักษณะของซอฟต์แวร์ QSPAK Vision Unit และการวัดรอยสึกหรอของบอล .	45
ภาพประกอบ 25 ลักษณะและตัวแปรในการวัดรอยสึกหรอของบอลที่ทดสอบด้วย Ball-on-Disk	46
ภาพประกอบ 26 เครื่องเพรสแบบไฮดรอลิกขนาด 800 kN.....	48
ภาพประกอบ 27 ลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์และอุปกรณ์วัดในการทดสอบการลากขึ้นรูป	48
ภาพประกอบ 28 เครื่องตัดเฉือนโลหะแผ่น.....	50
ภาพประกอบ 29 เครื่องมือวัดความหนาผิว	50
ภาพประกอบ 30 เครื่องมือวัดสมบัติทางกลของวัสดุในระดับนาโน	51
ภาพประกอบ 31 โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์	53
ภาพประกอบ 32 กรอบแนวคิดในการทำวิจัยและการทดสอบที่เลือกใช้	54
ภาพประกอบ 33 กราฟความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA.....	55
ภาพประกอบ 34 กราฟเส้นโค้งการไหลตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA	57
ภาพประกอบ 35 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) วัสดุขึ้นงาน และ (b) วัสดุทำแม่พิมพ์	58
ภาพประกอบ 36 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด DLC.....	60
ภาพประกอบ 37 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด CrN	60
ภาพประกอบ 38 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiN	60
ภาพประกอบ 39 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiCN.....	61
ภาพประกอบ 40 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiAlN	61
ภาพประกอบ 41 ลักษณะของผิวบอลบริเวณพื้นที่สัมผัสกับผิวของวัสดุขึ้นงานที่ได้จากการทดสอบ	63

ภาพประกอบ 42 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตามจากการทดสอบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์	65
ภาพประกอบ 43 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุ SUS304 BA กับวัสดุ SKD11 บนสภาพไม่มีการหล่อลื่นตามเงื่อนไขต่างๆ	66
ภาพประกอบ 44 กราฟปริมาตรการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 807 MPa.....	68
ภาพประกอบ 45 กราฟปริมาตรการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 1095 MPa.....	68
ภาพประกอบ 46 กราฟปริมาตรการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 1280 MPa.....	69
ภาพประกอบ 47 อัตราการสึกหรอจำเพาะของบอล SKD11 ที่ระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัสต่างๆ.....	70
ภาพประกอบ 48 ลักษณะความเสียหายของบอล SKD11 ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 1200 m.....	71
ภาพประกอบ 49 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด DLC ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m.....	72
ภาพประกอบ 50 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด CrN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m.....	72
ภาพประกอบ 51 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m.....	73
ภาพประกอบ 52 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiCN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m.....	73
ภาพประกอบ 53 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiAlN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m.....	74
ภาพประกอบ 54 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 807 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 50 mm/s	78

[illegible]

ภาพประกอบ 64 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ยของผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุ ชิ้นงาน	84
ภาพประกอบ 65 ผลการทดสอบการขีดข่วนบนผิวฟิล์มแข็ง	85
ภาพประกอบ 66 กราฟปริมาตรการสึกของของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งเทียบกับระยะ ทางการเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทดสอบต่าง ๆ	86
ภาพประกอบ 67 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมผลการลากขึ้นรูป	87
ภาพประกอบ 68 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ของพันธที่เทียบกับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป	88
ภาพประกอบ 69 จำนวนถ้วยที่สามารถลากขึ้นรูปได้ด้วยแม่พิมพ์ภายใต้สภาวะทางไดรบบอโลยี ต่างๆ	93
ภาพประกอบ 70 แผนภาพแรงขึ้นรูปและระยะทางการเคลื่อนที่ของพันธ	95
ภาพประกอบ 71 ความหนาของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูป	96
ภาพประกอบ 72 ความหนาของถ้วยชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ	97
ภาพประกอบ 73 เปรียบเทียบลักษณะสภาพผิวของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน	98
ภาพประกอบ 74 ผลการจำลองการทำงานการลากขึ้นรูปเพื่อหาค่าความดันสัมผัส	99
ภาพประกอบ 75 กราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายภายใต้สภาวะและเงื่อนไขการลากขึ้นรูป	100
ภาพประกอบ 76 ลักษณะความเสียหายของบอล SKD11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะทางไดรบบอโลยี ต่างๆ ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 50 m และ 1200 m	101
ภาพประกอบ 77 ปริมาตรการสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะทางไดรบบอโลยี ต่างๆ	102
ภาพประกอบ 78 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุชิ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูป	103

บทที่ 1

บทนำ

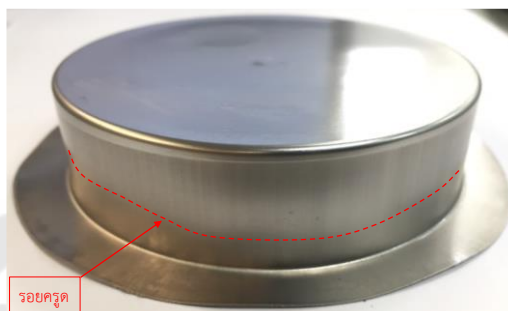
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โลหะเป็นวัสดุวิศวกรรมที่ได้รับความนิยมใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ เครื่องครัว ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือแพทย์ ชิ้นส่วนอากาศยาน และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น โดยโลหะแบ่งได้หลายประเภทและยังสามารถแบ่งตามเกรดตามมาตรฐานต่างๆ อีก ทั้งนี้การแปรรูปโลหะเป็นชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากนิยมใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ (Forming) โดยอาศัยแรงกระทำผ่านเครื่องมือ (Tool) ที่เรียกว่า “แม่พิมพ์หรือตาย (Die)” ให้โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) อย่างไรก็ตามโลหะแต่ละชนิดและแต่ละเกรดจะมีความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) และสมบัติทางไทรบอลโลยีระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับเครื่องมือที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกทั้งสองรวมกันว่า “พฤติกรรม การขึ้นรูป (Forming behavior)” ดังนั้นผู้ออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะจึงจำเป็นต้องทราบถึง พฤติกรรมการขึ้นรูปของวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป เพื่อให้สามารถออกแบบกระบวนการให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จ

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นโลหะกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่มีสมบัติพิเศษในเรื่อง ทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และป้องกันการเกิดสนิม จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดิบเพื่อผลิต ชิ้นส่วนที่ต้องการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนและเกิดสนิมได้ง่าย แต่จากรายงานของโรงงานการศึกษาซึ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ชั้นนำของประเทศไทยพบว่า การขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น อบอ่อน และปรับปรุงสภาพผิวให้มีความเงาพิเศษ เกรด SUS304 BA เกิดรอยขีดข่วน (Scratch) ที่ผิวชิ้นงาน เมื่อทำการลากขึ้นรูป (Deep drawing) ชิ้นงานโลหะแผ่นดังกล่าวได้ระยะเวลาหนึ่ง (ไม่เกิน 100 ชิ้น) โดยสาเหตุเนื่องจากเกิดการยึดติด (Adhesion) ของวัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นที่ทำการลากขึ้นรูปบนผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป ทำให้การขึ้นรูป ครั้งต่อไปเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงาน ดังภาพประกอบ 1 ทำให้ต้องนำแม่พิมพ์ดังกล่าวไปปรับแต่งผิวใหม่เพื่อกำจัดเศษวัสดุชิ้นงานที่ยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ออก ส่งผลให้เสียเวลาการผลิตและก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการเนื่องจากการผลิตชิ้นงานที่มีผิวไม่ได้ตามคุณภาพกำหนด

ปัญหาการยึดติดในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมของบริษัทรถจักรยานยนต์ศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1-4] ซึ่งรายงานถึงปัญหาการยึดติดของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆ บนผิวเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามปัญหาการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นไม่ใช่มีแค่เรื่อง การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ แต่ยังมีเรื่องการแตก (Fracture) และการย่น (Wrinkle) ที่

เกิดกับชิ้นงานลากขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของวัสดุชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป [5] โดยที่ปัญหาดังกล่าวเกิดจากการกำหนดตัวแปรของกระบวนการ (Process parameters) ที่ไม่เหมาะสม



ภาพประกอบ 1 ชิ้นงานที่เกิดรอยรูดเนื่องจากการยึดติดบนผิวตาย

จากข้อมูลข้างต้น สามารถแยกปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่สองปัญหาหลัก คือ 1) ปัญหาการยึดติดซึ่งเป็นสาเหตุของรอยรูด และ 2) ปัญหาความสามารถในการลากขึ้นรูป ซึ่งเรียกรวมกันว่า “พฤติกรรมของการลากขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงาน” จากปัญหาทั้งสองทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน และตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการและแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปในการลดปัญหาการเกิดการยึดติดของชิ้นงานบนผิวตายขึ้นรูปชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูป
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อพฤติกรรมของการลากขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงานและพฤติกรรมทางไทรบอลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวแปรต้น

- ก. ขนาดองศาของมุมพับ มี 3 ระดับ คือ 0° , 15° และ 30°
- ข. ขนาดรัศมีของมุมดัด มี 3 ระดับ คือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mm
- ค. แรงจับยึดแผ่นชิ้นงาน มี 3 ระดับ คือ 5.0, 8.0 และ 12.0 kN
- ง. สภาพการหล่อลื่นมี 3 รูปแบบ คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น ใช้สารหล่อลื่น และเคลือบผิววัสดุทำแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็ง

2 ตัวแปรตาม

ได้แก่พฤติกรรมของการลากขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วย

- ก. ค่าขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting drawing ratio; LDR)
- ข. ค่าความหนาผิวของชิ้นงานจากการลากขึ้นรูป
- ค. ความหนาของชิ้นงานจากการลากขึ้นรูป

3. ตัวแปรควบคุม

- ก. วัสดุชิ้นงานที่ทำการศึกษาเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น อ่อน และปรับปรุงสภาพผิวให้มีความเงาพิเศษ เกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm
- ข. ชิ้นงานที่ศึกษาเป็นชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากบริษัทรถจักรยานยนต์ศึกษา ดังภาพประกอบ 2 (ก) โดยผู้วิจัยเลือกศึกษาจากขั้นตอนการผลิตที่เกิดรอยครูด ได้แก่ ขั้นตอนการลากขึ้นรูปดังชิ้นงานภาพประกอบ 2 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2 (ก) ชิ้นงานรถจักรยานยนต์ศึกษา (ข) ชิ้นงานทดลองลากขึ้นรูป

ปัจจุบันการผลิตชิ้นงานรถจักรยานยนต์ศึกษามีกระบวนการขึ้นรูปโลหะ 4 ขั้นตอน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นในลักษณะถ้วย

ทรงกระบอกมีปีก ดังรูปที่ 1.2 (ข) โดยทำการสร้างแม่พิมพ์ทดลองลากขึ้นรูปเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่ทำการศึกษาด้วยตัวแปรของกระบวนการตามขอบเขตที่กำหนด ทั้งนี้ในการกำหนดค่าตัวแปรจะอ้างอิงจากข้อมูลการผลิตจริงในปัจจุบันโดยกำหนดเป็นค่ากลางและเพิ่มค่าตัวแปรที่ศึกษาในลักษณะค่าที่น้อยกว่าและค่าที่มากกว่าค่ากลาง

ค. พันช์ ดาย และ ตัวจับยึดแผ่นชิ้นงาน ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS และทำการชุบแข็ง (Hardening) ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้ได้ค่าความแข็งในช่วง 60 ± 2 HRC โดยปรับแต่งผิวให้มีค่าความหยาบผิว (Surface roughness) ในบริเวณที่สัมผัสกับผิวของวัสดุชิ้นงานที่ศึกษาเท่ากับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $Ra\ 0.1 \pm 0.05\ \mu m$

ง. การทดลองลากขึ้นรูปใช้ความเร็ว 7 mm/s

จ. สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองลากขึ้นรูป ได้แก่ สารหล่อลื่นสำหรับงานขึ้นรูปโลหะ ยี่ห้อ LUBE TECH เกรด G-3153 Stamping Oil โดยใช้ทดสอบเฉพาะในการทดลองลากขึ้นรูปที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์

ช. การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8

ซ. การทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM G 99-95a และ ASTM G 133-05

ณ. फिल्मเคลือบผิวที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยี ได้แก่ फिल्मแข็งชนิด DLC, CrN, TiN, TiCN และ TiAlN ที่เคลือบด้วยกระบวนการ PVD

ณ. เลือกชนิดฟิล์มที่มีสมบัติทางไทรบอโลยีดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีเพื่อใช้เคลือบผิวแม่พิมพ์และทดสอบด้วยการลากขึ้นรูปตามตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองการลากขึ้นรูป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 ทราบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

2 ทราบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์

3 ทราบความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA และสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน

4 ทราบตัวแปรที่เหมาะสมของกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm

5 ทราบชนิดฟิล์มแข็งที่เหมาะสมในการลดปัญหาการยึดติดของกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA บนผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการลากขึ้นรูป

6 เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่ภาคอุตสาหกรรมในการออกแบบและควบคุมกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA



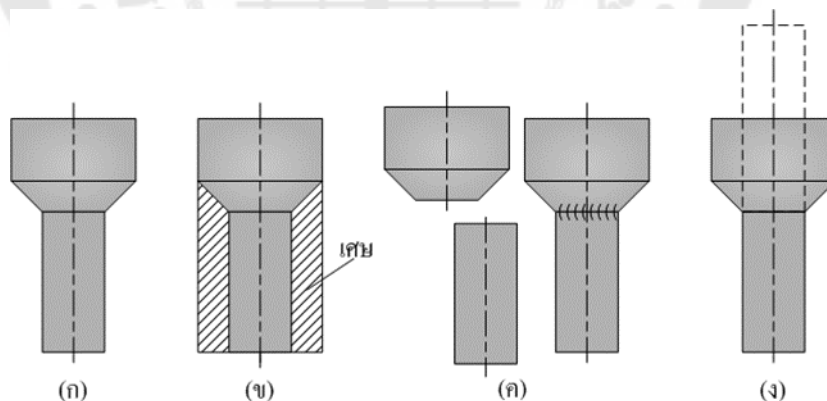
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยนี้มีแนวทางในการดำเนินงานและมีทฤษฎีและงานวิจัยอ้างอิง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การขึ้นรูปโลหะ

โลหะ เป็นวัสดุวิศวกรรมที่ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ทั้งจากโลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous) ในอุตสาหกรรมการผลิต การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของโลหะให้เป็นผลิตภัณฑ์อาจทำได้หลายวิธีดังเช่นในภาพประกอบ 3 โดยชิ้นส่วนเครื่องจักรกลดังกล่าวสามารถผลิตได้ด้วยกรรมวิธีการหล่อ การกลึง การเชื่อมประกอบ ชิ้นส่วนที่ผ่านการตบแต่งรูปทรงมาแล้ว แต่กรรมวิธีที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวในแง่ของต้นทุนค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุดกรรมวิธีหนึ่งคือ การขึ้นรูปโดยควบคุมการเปลี่ยนรูปเพื่อให้ชิ้นงานโลหะเกิดรูปทรงตามที่ต้องการ



ภาพประกอบ 3 เปรียบเทียบการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ [6]

(ก) การหล่อ (ข) การกลึง (ค) การเชื่อมประกอบ (ง) การขึ้นรูป

ที่มา Lange, K. (1985). *Handbook of Metal Forming*: Society of Manufacturing Engineers SME. [6]

จากภาพประกอบ 3 การผลิตด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปดังรูป (ง) จะไม่เสียเศษวัสดุ มวลหรือปริมาตรของชิ้นงานก่อนและหลังการขึ้นรูปไม่เปลี่ยนแปลง สามารถกำจัดโพรงอากาศในเนื้อวัสดุได้ ช่วยเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป มีความแม่นยำของรูปทรงสูง ลดขั้นตอนการผลิต ตลอดจนมีผลผลิตสูง ดังนั้นการขึ้นรูปโลหะจึงเป็นกระบวนการที่นิยมในปัจจุบันและสำคัญกระบวนการหนึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์โลหะ มีวิวัฒนาการและมีงานวิจัยเกิดขึ้นอย่างมากมาโดยตลอด และมีผู้ให้ความสนใจศึกษาเพิ่มมากขึ้น

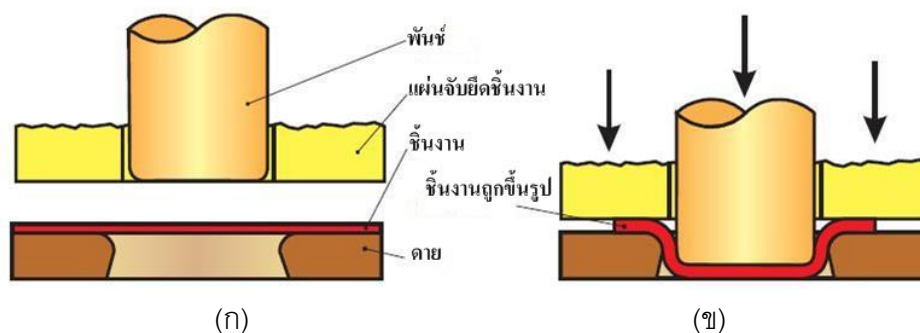
ตามมาตรฐาน DIN8582 [7] แบ่งชนิดการขึ้นรูปโลหะเป็นกลุ่มโดยพิจารณาจากชนิดและทิศทางของแรงที่กระทำกับเนื้อวัสดุชิ้นงาน ได้ดังนี้

1. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะการอัด (Forming under Compressive Conditions)
2. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะการดึงและการอัด (Forming under Combined Tensile and Compressive Conditions)
3. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะการดึง (Forming under Tensile Conditions)
4. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะการดัด (Forming under Bending Conditions)
5. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะการเฉือน (Forming under Shearing Conditions)

จากขอบเขตของการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ กระบวนการขึ้นรูปหลักที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานกรณีศึกษาดังภาพประกอบ 1 เป็นกระบวนการลากขึ้นรูป (Deep drawing) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มการขึ้นรูปภายใต้สภาวะการดึงและการอัดตามมาตรฐาน DIN8582

2.1.1 การลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

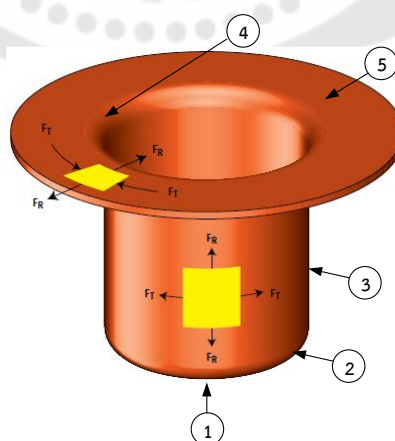
การลากขึ้นรูปเป็นการขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดึงและแรงอัด ชิ้นงานเริ่มต้นหรือแผ่นเปล่า (Blank) โลหะแผ่นที่ถูกเตรียมขนาดไว้แล้วถูกวางบนดาดังภาพประกอบ 4 (ก) เมื่อทำการขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัวผู้หรือพังก์ (Punch) จะทำการลากแผ่นเปล่าผ่านดาดโดยมีตัวหรือแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder) ควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานดังภาพประกอบ 4 (ข) โดยตามทฤษฎีแผ่นเปล่าที่ผ่านการลากขึ้นรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาเพียงเล็กน้อยเกิดเป็นรูปทรงมีขนาดตามดาด



ภาพประกอบ 4 เครื่องมือสำหรับการลากขึ้นรูป

ที่มา Schuler Gmb, H. (1998). Metal forming handbook: Berlin[7]

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก คือ พินช์ ดาย และแผ่นจับยึดชิ้นงาน ในกระบวนการนี้โลหะแผ่นจะถูกลากผ่านรัศมีดายเข้าสู่ดายโดยมีแผ่นจับยึดชิ้นงานควบคุมการไหลเพื่อไม่ให้บริเวณปีกชิ้นงานเกิดรอยยับ การควบคุมการไหลของวัสดุชิ้นงานสามารถทำได้โดยควบคุมแรงกดที่แผ่นจับยึดชิ้นงานโดยกระบวนการนี้ความหนาของโลหะชิ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลงแผ่นชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเกิดทั้งการดัด การดัดกลับ (Re-bending) และถูกยืดให้ตรง (Straightening out) ซึ่งจะเกิดสภาวะแรงต่าง ๆ ณ ช่วงการลากขึ้นรูป ดังแสดงในภาพประกอบ 5 โดยที่ F_T คือ แรงดึงในทิศทางแนวรัศมีของการลากขึ้นรูป และ F_R คือ แรงดึงในทิศทางแนวขนานกับทิศทางการลากขึ้นรูป



ภาพประกอบ 5 ลักษณะของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป

ที่มา Schuler Gmb, H. (1998). Metal forming handbook: Berlin[7]

เมื่อพิจารณาแต่ละส่วนของถ้วยที่ทำการขึ้นรูปดังภาพประกอบ 5 สามารถแบ่งบริเวณของถ้วยได้ดังนี้ [8]

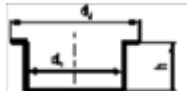
บริเวณที่ 1 เป็นส่วนของก้นถ้วย แทบไม่มีการเปลี่ยนรูปจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะที่ถูกขึ้นรูปบริเวณนี้น้อยมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่พ้นจากพาโลหะแผ่นขึ้นงานเข้าไปในด้าย

บริเวณที่ 2 เป็นส่วนที่แผ่นโลหะถูกตัดโค้งตามรัศมีของพันธ์ เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างก้นถ้วยกับผนังของถ้วย ทำให้บริเวณนี้ถูกส่งผ่านแรงจากก้นถ้วยเนื่องจากการลากพาของพันธ์ขณะขึ้นรูป ทำให้เกิดความเค้นดัดและดึงในแนวแกน Y ส่งผลให้เนื้อโลหะแผ่นบริเวณนี้เกิดการยืดตัวและความหนาลดลงได้ กรณีที่เกิดการเปลี่ยนรูปมากเนื้อของโลหะแผ่นอาจการฉีกขาด

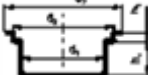
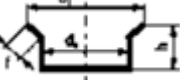
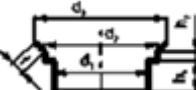
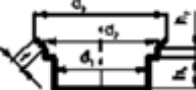
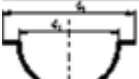
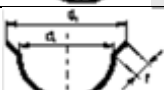
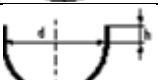
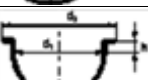
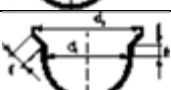
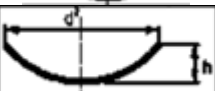
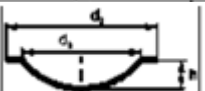
บริเวณที่ 3 เป็นส่วนที่แผ่นโลหะถูกตัดโค้งตามรัศมีของด้าย เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างปีกถ้วยกับผนังของถ้วย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วย เนื้อโลหะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงเนื่องจากเนื้อวัสดุเอง และยังเกิดความเค้นดึงขึ้นด้วยเนื่องจากการลากพาโลหะแผ่นของพันธ์ ดังนั้นจึงเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุด บริเวณนี้จะมีแรงต้านทานการไหลหรือแรงเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับผิวดายรวมถึงแรงเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับผิวดัวจับยึดขึ้นงาน ที่บริเวณนี้จะพบว่าแผ่นโลหะมักมีความหนาเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการย่นตัว (Wrinkle) ของเนื้อโลหะแผ่นเนื่องจากการอัดตัวในแนวเส้นรอบวง

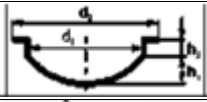
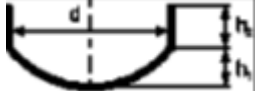
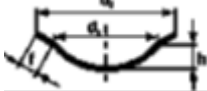
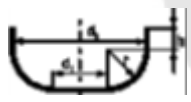
ตาราง 1 สูตรคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นงานก่อนขึ้นรูป

Container shape (Cross-section)	Blank diameter D =
Rotationally symmetrical shapes	
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h_1}$

ตาราง 1 (ต่อ)

Container shape (Cross-section) Rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)^*}$
	$\sqrt{d_3^2 + 4(d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)^*}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4d_1 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_2 \cdot h_2)^*}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f(d_2 \cdot d_3)^*}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f(d_2 \cdot d_3)^*}$
	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1.414 \cdot d$
	$\sqrt{d_1^2 + d_1^2}$
	$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$1.414 \cdot \sqrt{d^2 + 2 \cdot d \cdot h}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
	$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot h + f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot h^2}$

ตาราง 1 (ต่อ)

Container shape (Cross-section) Rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot f(d_1 \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + d_3^2 - d_2^2}$ or $\sqrt{d_3^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot f(d_2 + d_3)}$ or $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2(0.57 \cdot r + h + 0.5 \cdot f) + 2 \cdot d_3 \cdot f - 0.56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(1.57 \cdot r \cdot d_1 + 2 \cdot r^2 + d_2 \cdot h)}$ or $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$

**ชิ้นงานที่กันด้วยมีรัศมีน้อยกว่า 10 mm

ที่มา Lange, K. (1985). Handbook of Metal Forming: Society of Manufacturing Engineers SME.[6]

2.1.1.1 การหาขนาดแผ่นเปล่า ขนาดแผ่นเปล่าหรือขนาดชิ้นงานเริ่มต้นที่เหมาะสมมีความสำคัญกับความสำเร็จในการขึ้นรูป หลักการเบื้องต้นคือขนาดแผ่นเปล่าควรมีขนาดเล็กที่สุดที่จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการได้ ด้วยเหตุผล คือ การประหยัดวัสดุและลดอัตราส่วนการขึ้นรูปให้น้อยที่สุด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น/ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป) ซึ่งจะช่วยลดโอกาสความเสียหายที่เกิดกับ

ชิ้นงาน การหาขนาดแผ่นเปล่าสำหรับขึ้นรูปด้วยรูปทรงกระบอกสมมาตรสามารถหาได้จากสมการในตารางที่ 2.1 ส่วนรูปทรงชิ้นงานที่ไม่เป็นทรงกระบอกสมมาตรไม่มีสมการตายตัวในการคำนวณ ต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบ และลองผิดลองถูก (Trial and Error) แต่ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและจำลองการทำงานจึงง่ายต่อการออกแบบมากขึ้น

2.1.1.2 ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio; LDR) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการลากขึ้นรูปของวัสดุในกรณีงานลากขึ้นรูปด้วยกลม ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันทึ หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยที่มากที่สุดที่สามารถลากขึ้นรูปได้ โดยที่บริเวณก้นถ้วยหรือชิ้นงานไม่เกิดการฉีกขาด ดังแสดงได้ดังสมการที่ (2.1) [7]

$$\beta = \frac{d_0}{d_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ β คือ ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป
 d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน (mm)
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันทึ (mm)

สำหรับการลากขึ้นรูปสามารถกระทำได้ เมื่อ $\beta < 2.0$ แต่หาก β มีค่า > 2.0 ต้องทำการลากขึ้นรูปมากกว่าหนึ่งครั้งขึ้นไป เนื่องจากวัสดุเกิดความเค้นตกค้างภายในทำให้เกิดความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ในเนื้อวัสดุ ซึ่งอาจต้องแบ่งระดับของค่า β ในแต่ละขั้นตอนเป็น $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ซึ่งผลรวมของอัตราส่วนการขึ้นรูปรวม $\beta_{total} = (\beta_1) \cdot (\beta_2) \cdot \dots \cdot (\beta_n)$ ในการกำหนดค่าขีดจำกัดขึ้นรูปแต่ละขั้นตอนอาจกำหนดเท่ากับ $\beta_1 = 2.0, \beta_2 = 1.3$ และ $\beta_3 = 1.3$ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป คือ ค่าอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพันทึกับความหนาแผ่นชิ้นงาน โดยค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจะสูงขึ้นถ้าอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางพันทึกับความหนาแผ่นชิ้นงานมีค่าต่ำ และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานกับความหนาแผ่นชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป ของแต่ละวัสดุจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ เช่นแผ่นโลหะมีค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปอยู่ในช่วงระหว่าง 1.8 ถึง 2.2 แต่เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพและส่วนผสมของโลหะ [7] ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปไม่เกิน 2.0 ในการพิจารณากำหนดขั้นตอนการลากขึ้นรูป

2.1.1.3 แรงลากขึ้นรูป การคำนวณหาแรงลากขึ้นรูป (Deep drawing force) สำหรับการลากขึ้นรูปเพียงขั้นตอนเดียวสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.2) ดังนี้ [7]

$$F_D = \pi \cdot (d_p + S) \cdot S \cdot \sigma_U \cdot 1.2 \cdot \left(\frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ F_D คือ แรงลากขึ้นรูป (N)

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินช์ (mm)

S คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)

σ_U คือ ความแข็งแรงดึงของวัสดุ (N/mm²)

β คือ อัตราส่วนการขึ้นรูป

β_{max} คือ อัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด

2.1.1.4 แรงจับยึดชิ้นงาน [6] แรงจับยึดชิ้นงาน (Blankholder force; F_{BH}) หรือแรงกดเหยียบชิ้นงาน มีความสำคัญมากในงานลากขึ้นรูป เพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น และมีอิทธิพลต่อการเกิดความเครียดบริเวณผิวด้านบนชิ้นงาน ถ้าใช้แรงในการจับยึดชิ้นงานน้อยเกินไปจะส่งผลให้ปีกชิ้นงานเกิดรอยย่น แต่ถ้าให้แรงในการจับยึดมากเกินไปจะทำให้การไหลตัวของชิ้นงานไม่ดีเกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วยได้ ดังในรูปที่ 2.4 แรงในการจับยึดชิ้นงานสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.3)



ภาพประกอบ 6 ชิ้นงานถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูป

ที่มา Tschaetsch, H., และ Koth, A. (2006). Metal forming practise: Processes - Machines – Tools [9]

$$F_{BH} = P_{BH} \cdot A_{BH} \quad (2.3)$$

เมื่อ P_{BH} คือ แรงดันในการกดแผ่นจับชิ้นงาน (N)

A_{BH} คือ พื้นที่บริเวณปีกที่แผ่นจับขึ้นงานกดอยู่ (mm^2)

แรงดันในการกดแผ่นจับขึ้นงานหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$P_{BH} = 10^{-3} \cdot C \cdot \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005D}{S} \right] \cdot \sigma_U \quad (2.4)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ มีค่าระหว่าง 2 ถึง 3

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นงานก่อนขึ้นรูป (mm)

β คือ อัตราส่วนการขึ้นรูป

S คือ ความหนาของขึ้นงาน (mm)

σ_U คือ ความแข็งแรงดึงของวัสดุ (N/mm^2)

พื้นที่บริเวณปีกที่แผ่นจับขึ้นงานกดอยู่ A_{BH} สามารถหาได้จาก สมการที่ (2.5)

$$A_{BH} = \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (d_p + (2r))^2] \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นงานก่อนขึ้นรูป (mm)

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ (mm)

r คือ รัศมีของมุมตาย (mm)

ในกรณีที่ค่ารัศมีมุมตายกับค่าเคลือบแรนซ์ของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ เราสามารถลดสมการลงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$A_{BH} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_p^2) \quad (2.6)$$

2.1.1.5 เคลือบแรนซ์ของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป โดยทั่วไประยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์หรือเคลือบแรนซ์ (C_I) ของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปจะมีขนาดมากกว่าความหนาขึ้นงานเริ่มต้นเล็กน้อย หากเคลือบแรนซ์มีค่ามากเกินไปจะทำให้ได้รูปทรงของถ้วยไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการเนื่องจากการขยายตัวบริเวณปากถ้วย แต่ถ้าหากออกแบบให้เคลือบแรนซ์มีค่าน้อยกว่าความหนาขึ้นงาน จะเป็นการรีดลดความหนา (Ironing) ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปที่สูง แม่พิมพ์สึกหรอเร็ว และคุณภาพผิวของขึ้นงานอาจไม่ได้ตามที่ต้องการ ในการขึ้นรูปวัสดุทั่วไปอาจหาค่าเคลือบแรนซ์ที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 2.7)[10]

$$C_l = S \cdot \sqrt{\frac{D}{d_p}} \quad (2.7)$$

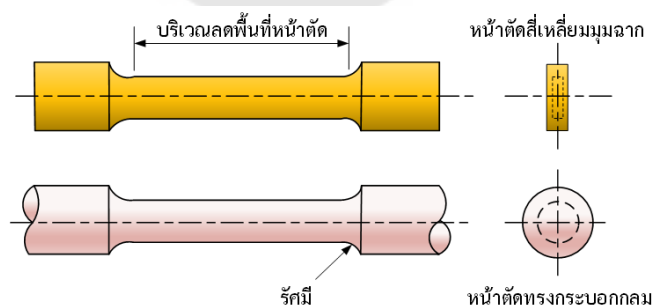
เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานก่อนขึ้นรูป (mm)
 d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ (mm)
 S คือ ความหนาชิ้นงานเริ่มต้น (mm){

2.1.1.6 **รัศมีพันธและรัศมีตาย** รัศมีพันธ (R_p) เป็นตัวกำหนดรัศมีของกันด้วยในกรณีขึ้นงานกลม หากออกแบบให้มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้กันด้วยแตก ค่าแนะนำที่เหมาะสมคือไม่ควรน้อยกว่า 4 - 5 เท่าของความหนาชิ้นงาน [11] สำหรับรัศมีตาย (R_d) นั้น เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จในการลากขึ้นรูป รัศมีตายสามารถหาได้จากสมการที่ (2.8) [6]

$$R_d = 0.035 \cdot [50 + (D - d_p)] \cdot \sqrt{S} \quad (2.8)$$

2.2 การหาสมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานโดยการทดสอบด้วยแรงดึง

การทดสอบด้วยแรงดึง เป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing) ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมใช้ทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ ขึ้นทดสอบจะถูกดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial) ให้ขาดออกจากกัน โดยขึ้นทดสอบอาจเป็นแผ่นสตริป (Strip) หน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก หรือ เป็นแท่ง (Rod) หน้าตัดทรงกระบอกกลมดังภาพประกอบ 7 ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุที่ต้องการทดสอบ แต่รูปร่างและขนาดของขึ้นทดสอบต้องเตรียมให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบด้วยแรงดึงที่กำหนด



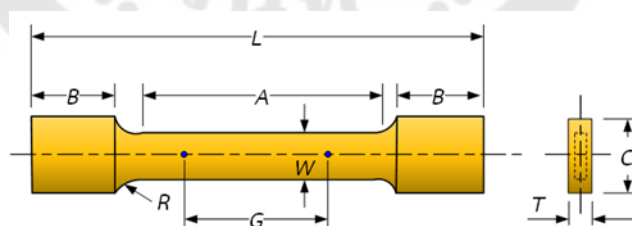
ภาพประกอบ 7 ลักษณะขึ้นทดสอบแรงดึง

2.2.1 มาตรฐานและเครื่องมือในการทดสอบ

การทดสอบด้วยแรงดึงกับวัสดุเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่เป็นที่ยอมรับ ผู้ทดสอบจำเป็นต้องดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ทำการทดสอบ เช่น มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society of Testing and Materials; ASTM) ASTM E8 เป็นมาตรฐานการทดสอบด้วยแรงดึงสำหรับวัสดุโลหะ (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) ASTM B557 เป็นมาตรฐานวิธีการทดสอบด้วยแรงดึงของอลูมิเนียมหล่อและแมกนีเซียมอัลลอยด์ (Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium- Alloy Products) หรือ ASTM D638 เป็นมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาสมบัติแรงดึงสำหรับพลาสติก (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) เป็นต้น นอกจากนี้มาตรฐาน ASTM แล้ว ยังมีมาตรฐานการทดสอบขององค์กรอื่นๆ ให้เลือกใช้อีก เช่น มาตรฐาน Deutsches Institut für Normung (DIN) และ Japanese Industrial Standard (JIS) เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM E8 เป็นข้อกำหนดในการทดสอบด้วยแรงดึงโลหะเพื่อหาค่า ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว (% Elongation) และร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% Reduction of area) สำหรับชิ้นทดสอบที่เตรียมจากโลหะแผ่นมีขนาดตามตารางที่ 2.2

ตาราง 2 ขนาดชิ้นทดสอบแรงดึงแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมถูกเตรียมจากโลหะแผ่น



	ขนาด [mm]
ความยาวเกจ (G)	50.0 ± 0.1
ความกว้าง (W)	12.5 ± 0.2
ความหนา (T)	เท่ากับความหนาโลหะแผ่น
รัศมีฟิลเลท (R)	12.5
ความยาวชิ้นทดสอบ (L)	200

ตาราง 2 (ต่อ)

	ขนาด [mm]
ความยาวส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (A)	57
ความยาวส่วนยึดขึ้นทดสอบ (B)	50
ความกว้างส่วนยึดขึ้นทดสอบ (C)	20

ในปัจจุบันนิยมใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ที่ให้แรงได้ทั้งชนิดแรงดึงและแรงอัด เป็นเครื่องมือทดสอบ การจับยึดขึ้นทดสอบกับเครื่องทดสอบ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นทดสอบที่เตรียมตามมาตรฐาน การทดสอบต้องจับยึดขึ้นทดสอบให้อยู่ในแนวเส้นขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องทดสอบไม่เอียงศูนย์ เพื่อให้มั่นใจว่าแรงดึงที่ใช้ทดสอบตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดรับแรงของชิ้นทดสอบ การจับขึ้นงานไม่ดีจะทำให้ความเค้นกระจายไม่ทั่วหน้าตัด หรือกระจายไม่สม่ำเสมอ เกิดแรงดึงไม่เท่ากันตลอดช่วงความยาวเกจ ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบเกิดความผิดพลาด

2.2.2 เส้นโค้งการไหลตัวของโลหะ

ในการหาความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) โดยการพิจารณาพื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบในการพิจารณาและคำนวณค่าความเค้นกับความเครียดเป็นหลักนั้น เหมาะกับการพิจารณาพฤติกรรมสมบัติของวัสดุในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของหน้าตัดที่ลดลงหรือความยาวที่เพิ่มขึ้นของชิ้นทดสอบ ซึ่งความจริงในขณะที่ยืดขึ้นทดสอบถูกดึงจนทำให้ในเนื้อวัสดุมีความเค้นเกิดขึ้นเท่ากับหรือมากกว่าค่าความเค้นที่จุดครากตัว พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นทดสอบจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดการรับแรงดึงจนเกิดคอคอด (Necking) และขาดออกจากกัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรม การขึ้นรูปโลหะได้อย่างถูกต้อง ผู้ออกแบบกระบวนการและวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะ จึงต้องนำการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดและความยาวขึ้นทดสอบมาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งจะได้พิจารณาจากความสัมพันธ์และค่าความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering stress-strain) แต่จะพิจารณาจากความเค้นจริงและความเครียดจริง (True stress and true strain) ที่เกิดขึ้นขณะขึ้นทดสอบได้รับแรงและเกิดการเปลี่ยนรูป ความสัมพันธ์ของความเค้นจริงและความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง จะเขียนในรูปเส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งการไหลตัวของโลหะ

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะเป็นการทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุชิ้นงานในช่วงนี้จึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความเค้นกับความเครียด

โดยใช้พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป (A_i) และความยาวที่เปลี่ยนแปลง (l_i) ไปแต่ละขณะของแรงดึง ซึ่งความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีนี้เรียกว่า ความเค้นจริง ($\bar{\sigma}$) และความเครียดจริง ($\bar{\epsilon}$) ซึ่งหาได้จากสมการ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าความเค้นจริงและความเครียดจริงไปเขียนกราฟความสัมพันธ์แล้ว จะได้กราฟที่เรียกว่า “กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง หรือ เส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริง หรือ เส้นโค้งการไหลตัว (Flow curve)”

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A_i} \quad (2.9)$$

$$\bar{\epsilon} = \ln \left(\frac{l_i}{l_0} \right) \quad (2.10)$$

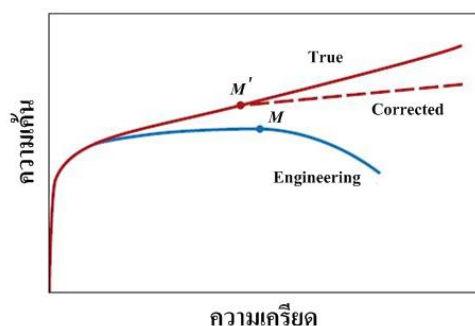
ความแตกต่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม กับ ความเค้นจริงและความเครียดจริงสามารถพิจารณาได้จากภาพประกอบ 8 ซึ่งพบว่าหลังจากที่ชิ้นทดสอบได้รับแรงดึงสูงสุด ชิ้นทดสอบจะเกิดคอคอด ที่จุด M และ M' ซึ่งสัมพันธ์กับเส้นโค้งความเค้นกับความเครียดเฉลี่ยที่มีลักษณะของความลาดเส้นกราฟเป็นลบ ส่วนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงยังมีความสัมพันธ์เชิงบวก และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในขณะที่มีค่าความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ในการทดสอบด้วยแรงดึงสำหรับวัสดุเหนียว ชิ้นทดสอบจะขาดบริเวณคอคอดซึ่งเกิดจากการยืดตัวของเนื้อวัสดุอย่างมาก ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่บริเวณดังกล่าวลดลง อาจส่งผลให้การพิจารณาค่าความเค้นจริงและเครียดจริงในช่วงดังกล่าวคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นหากชิ้นทดสอบเกิดคอคอดให้คำนวณหาความเค้นจริงปรับแก้ (Corrected stress; $\bar{\sigma}_u$) และความเครียดจริงปรับแก้ (Corrected strain; $\bar{\epsilon}_u$) โดยใช้สมการที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ เมื่อนำค่าดังกล่าวไปเขียนกราฟจะได้ดังเส้น Corrected ดังในภาพประกอบ 7

$$\bar{\sigma}_u = \frac{F_{max}}{A_u} \quad (2.11)$$

$$\bar{\epsilon}_u = \ln \left(\frac{A_i}{A_u} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ A_u คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะรับแรงดึงที่ F_{max}



ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม
กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง

ที่มา Callister, W., และ Rethwisch, D. (2007). *Material Science and Engineering – An Introduction*. [12]

จากภาพประกอบ 8 ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะหากใช้พฤติกรรมของวัสดุที่คำนวณจากความเค้นกับความเครียดเฉลี่ยหรือวิเคราะห์จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ก็จะทำให้ทำนายพฤติกรรมในช่วงเปลี่ยนรูปถาวรผิดพลาดได้ ค่าความเค้นจริงและความเครียดจริงมีความสัมพันธ์กับความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมดังสมการ 2.13 และ 2.14

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.13)$$

$$\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) \quad (2.14)$$

2.3 อิทธิพลของสมบัติวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรต่อการลากขึ้นรูป

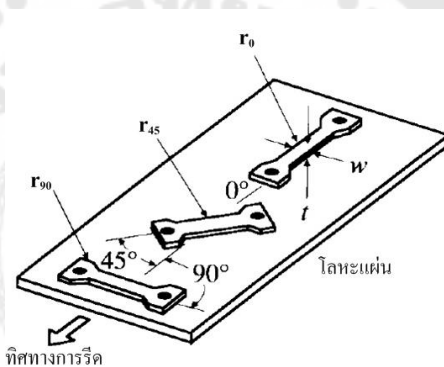
2.3.1 ความเครียดแข็ง

สำหรับในกระบวนการลากขึ้นรูป ความเครียดแข็ง (Strain hardening) จะส่งผลให้หลังการลากขึ้นรูปชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น ในการลากขึ้นรูปซ้ำอาจต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้น และอาจเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานได้

2.3.2 ค่าอัตราส่วนความเครียดถาวร (Plastic Strain Ratio; r)

ค่าอัตราส่วนความเครียดถาวรจะบอกถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางของวัสดุ โดยมากโลหะแผ่นที่ผ่านการรีดจะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกันในแต่ละทิศทางการรีด อัตราส่วนความเครียดถาวรหาได้จากการทดสอบแรงดึงโดยมีค่าเท่ากับ ความเครียดจริงของการเปลี่ยนแปลงด้านความกว้าง (ϵ_w) หารด้วยความเครียดจริงของการเปลี่ยนแปลงด้านความหนา (ϵ_t) ดังสมการที่ (2.15) ถ้าวัสดุมีค่า r เท่ากับ 1 หมายถึงวัสดุมีสมบัติเหมือนกันในแต่ละทิศทาง ซึ่งเรียกว่สวัสดุนี้นี้ว่า แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) โดยการหาค่าดังกล่าว ใช้การทดสอบด้วยแรงดึงกับชิ้นงานที่เตรียมตามภาพประกอบ 9

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2.15)$$



ภาพประกอบ 9 การตัดชิ้นทดสอบแรงดึงในแต่ละทิศทางการรีด

ที่มา Callister, W., และ Rethwisch, D. (2007). Material Science and Engineering – An Introduction.[13]

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (2.16)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (2.17)$$



ภาพประกอบ 10 ความไม่เสมอกันของขอบชิ้นงานลากขึ้นรูป

ที่ ม า Mielink, E. M. (1991). Metalworking Science and Engineering. NY: McGraw-Hill College. [13]

ถ้าวัสดุมีค่าดังกล่าวยิ่งสูง ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุนี้ก็ยิ่งสูงตามด้วย สำหรับ Δr ทำให้ขอบถ้วยไม่เสมอกัน หรือ เรียกว่า Earing ดังชิ้นงานในภาพประกอบ 10 หากวัสดุใดมีค่า $\Delta r = 0$ ชิ้นงานถ้วยที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุดังกล่าวจะไม่เกิด Earing

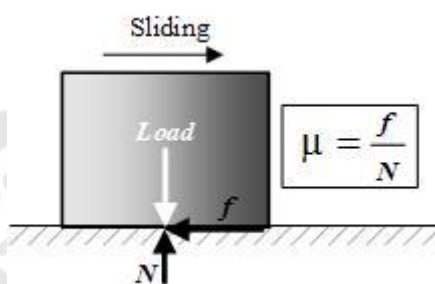
2.4 ไตรบอโลยี (Tribology) ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

ไตรบอโลยี คือ ศาสตร์ที่กล่าวถึง 3 สิ่ง คือ ความเสียดทาน (Friction) การสึกหรอ (Wear) และการหล่อลื่น (Lubrication) ซึ่งจะเกิดต่อเนื่องเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่างผิวสองผิวซึ่งเรียกว่าผิวคู่สัมผัส (Contacting surface)

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยเฉพาะโลหะแผ่น ผิวของวัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นกับผิวของวัสดุทำเครื่องมือ (Tool) หรือแม่พิมพ์ (Die) จะมีการสัมผัสและเคลื่อนที่สัมผัสกันขณะทำการขึ้นรูป ทำให้วิศวกรหรือผู้ออกแบบกระบวนการนอกจากต้องเลือกกระบวนการขึ้นรูปที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ชิ้นงานมีรูปร่างตามที่ต้องการแล้ว ปัจจัยอื่นอย่างวัสดุชิ้นงานที่จะทำการขึ้นรูป และวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ก็ต้องพิจารณาถึงด้วย เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อลักษณะและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างการขึ้นรูป การสึกหรอของแม่พิมพ์ และการเลือกใช้สารหล่อลื่นเพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งทั้งสามสิ่งที่กล่าวมาแล้วอาจเรียกรวมได้ว่าพฤติกรรมด้านไตรบอโลยีในการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นชนิดนั้นๆ ดังนั้นความเข้าใจด้านไตรบอโลยีจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผู้ออกแบบ และวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ [14]

2.4.1 ความเสียดทาน (Friction) ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ขณะที่พื้นผิวของวัสดุชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านสายด้วยแรงคงที่ ผิวของวัสดุชิ้นงานจะเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของสาย โดยมีแรงเสียดทานต้านการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง โดยทั่วไปขนาดของแรงเสียดทานจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient; μ) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง แรงเสียดทาน (Friction force; F) กับแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Normal force; N) ดังแสดงภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 11 ความเสียดทาน

ที่มา ภาสพิรุฬห์. (2552). การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. In: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี[14]

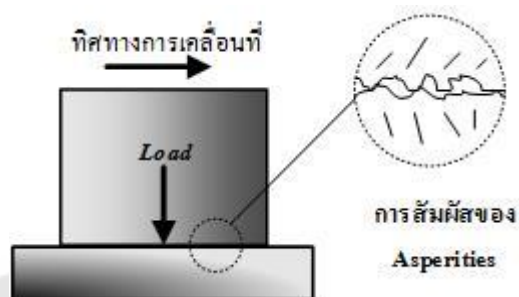
2.4.2 การสึกหรอ (Wear) ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

การสึกหรอ คือ การสูญเสียผิวของวัสดุอันเนื่องมาจากผิวสัมผัสเกิดการเคลื่อนที่ กลิ้ง ไถล หรือกระแทก มีความซับซ้อนคล้ายกับความเสียดทาน การสึกหรอเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่างและขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น ชนิดของวัสดุ โครงสร้างจุลภาคของผิว ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรง ปฏิกริยาทางเคมี และอุณหภูมิ เป็นต้น

การสึกหรอที่พบโดยทั่วไปในงานขึ้นรูปโลหะมักจะมีลักษณะซับซ้อนมีหลายกลไกที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน [14] ดังนั้นการวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันหรือแก้ไขจึงต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอ และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง การสึกหรอในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม [15, 16] คือ

2.4.2.1 การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive wear) เกิดจากผิววัสดุตั้งแต่สองผิวเคลื่อนที่สัมผัสกัน ทำให้บริเวณส่วนที่เป็นผิวหยาบซึ่งมียอดสูง (Asperity) ของวัสดุเกิดแรงเฉือน

หลุดไปติดผิวของวัสดุคู่สัมผัส เมื่อวัสดุทั้งสองยังคงเคลื่อนที่ต่อเนื่อง ผิวที่หลุดออกมาอาจจะหลุดย้ายกลับไปเกาะติดผิววัสดุเดิม หรือหลุดออกเกิดเป็นการสึกหรอขึ้น



ภาพประกอบ 12 การสึกหรอแบบเชื่อมติด

ที่มา ภาสพิรุฬห์. (2552). การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. In: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี[14]

จากภาพประกอบ 13 เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูงของวัสดุมาแตะกันนี้เรียกว่าเป็นพันธะแบบเชื่อมติด (Adhesion) ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกัน พันธะแบบเชื่อมติดจะสามารถยับและหลุดแตกออกจากกัน ถ้าหากว่าพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นก็แตกและผิวหน้านั้นจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคู่ผิวสัมผัส หรือถ้าหากว่าพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของยอดสูงของทั้ง 2 ผิวหน้า ก็อาจทำให้ยอดสูงของทั้ง 2 ผิวหน้าแตกหักออกมา ในช่วงที่เกิดการสึกหรอ การสร้างพันธะแบบเชื่อมติดและการแตกหักของผิววัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุตลอดเวลา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุทั้ง 2 มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างที่ดี ผิวหน้าใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) คือ การเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาจะถูกเร่งโดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี ทำให้เกิดออกไซด์บนผิววัสดุ เมื่อเกิดการสึกหรอดำเนินต่อไป เกิดการแตกหักของยอดผิวสูงอย่างต่อเนื่อง เศษของเนื้อวัสดุที่แตกออกก็จะมาทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมา ซึ่งชั้นนี้ก็จะมีการออกไซด์ของโลหะปะปนอยู่ด้วย โดยออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่จะทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นแตกง่าย

บางครั้งชั้นของเศษทับถมก็จะหลุดร่อนออกมาทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 ผิวสัมผัส [14-16]

2.4.2.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจากพฤติกรรมกรขีดข่วน ถู เชื้อน หรือกระแทก ซึ่งการกระทำเหล่านี้ทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกมาในลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ การสึกหรอแบบขัดถู ขึ้นกับหลายตัวแปร เช่นความแข็ง ถ้าความแข็งของวัสดุมากกว่า 1.2 เท่าของความแข็งของอนุภาค ความสามารถของอนุภาคในการเจาะเข้าทำลายผิวก็น้อย อนุภาคที่มีความแข็งมากจะทำให้อัตราการสึกหรอสูง ความแข็งของอนุภาคมีผลต่อการเปลี่ยน (Transition) ของอัตราการสึกหรอด้วย ถ้าค่าความแข็งใกล้เคียงกันก็จะขึ้นกับรูปร่างของอนุภาคและความแข็งแรงของอนุภาค อนุภาคที่เป็นเหลี่ยมไม่มน มีความแข็งแรงมากไม่แตกง่ายก็จะทำให้อัตราการสึกหรอสูง อนุภาคขนาดเล็กให้อัตราการสึกหรอต่ำกว่าขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กไหลตัวได้ง่ายทำให้ความเค้นที่จุดสัมผัสต่ำ การเกิดการสึกหรอแบบขัดถู [14-16] แสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 การเกิดการสึกหรอแบบขัดถู

2.4.2.3 การสึกหรออันเนื่องมาจากไตรบอทางเคมี (Tribochemical wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจากผิวชิ้นงานได้รับหรือเสียฟิล์มเคลือบหรือฟิล์มอื่นที่ผิวให้กับผิวชิ้นงานอื่น ซึ่งฟิล์มไตรบอดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวใหม่ที่ฟิล์มไปเกาะ ส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี เช่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidizing chemical reaction) และการแพร่ของสารละลายของแข็ง (Alloying by solid state inter diffusion) เป็นต้น บางกรณีไตรบอฟิล์มก็เป็นที่ต้องการเนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นทำตัวเป็นสารหล่อลื่นช่วยป้องกันการสึกหรอได้ [14-16]

2.4.3 การหล่อลื่น (Lubrication) ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

การหล่อลื่นเป็นสิ่งจำเป็นในการลดความเสียหายเพื่อป้องกันการสึกหรอ ในงานขึ้นรูปโลหะการหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสของเครื่องมือและชิ้นงานช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ส่งผลให้แรงในการขึ้นรูปลดลง ช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือ[14]

สารหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่การใช้สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันเป็นสารตั้งต้น การปรับปรุงผิวของเครื่องมือ (Surface treatment) การเคลือบผิว (Surface coating) ที่ผิวชิ้นงานหรือผิวเครื่องมือ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ปัจจุบันการปรับปรุงผิวและการเคลือบผิวเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะเนื่องจากสามารถลดการใช้สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันเป็นสารตั้งต้นที่อาจมีกากเคมีตกค้าง และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้

2.4.3.1 การปรับปรุงสภาพผิว (Surface treatment) เป็นการปรับปรุงสมบัติของผิววัสดุที่นิยมวิธีการหนึ่งในงานทางวิศวกรรมพื้นผิว (Surface engineering) ซึ่งกระทำโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวชิ้นงานให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับส่วนผสมและโครงสร้างภายในของชิ้นงานนั้น ๆ เช่น การทำให้สภาพผิวชิ้นงานแข็งขึ้น (Hardening) เพื่อลดการสึกหรอของชิ้นส่วนนั้นเมื่อสัมผัสกับผิวชิ้นงานอื่น กระบวนการที่นิยมในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะคือกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวด้วยความร้อน เช่น กระบวนการแพร่ทางความร้อน (Thermal diffusion) โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวชิ้นงานด้วยการเติมวานาเดียม (Vanadium; V) และไนโตรเจน (Nitrogen; N) เป็นต้น[14-18]

ในอุตสาหกรรมปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงาน กระบวนการแพร่ทางความร้อนด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์ อาจมีหลายชื่อเรียกเช่น Dicoat, TD-VC Coating หรือ TRD thermo-reactive diffusion แต่ก็เป็นที่รู้กันว่ากระบวนการดังกล่าวถูกพัฒนาโดยสถาบันวิจัยกลางบริษัทโตโยต้า (Toyota Central Research Institute Co., Ltd.) ซึ่งปัจจุบันถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ กระบวนการนี้เนื้อวัสดุโลหะที่ต้องการปรับปรุงสภาพผิวจะถูกจุ่มแช่อยู่ในเบ้าเกลือที่มีวานาเดียมบรรจุอยู่ อุณหภูมิสูงประมาณ 1020 °C เมื่อให้ความร้อนวานาเดียมในอ่างเกลือจะเกิดรวมตัวกับคาร์บอนในเนื้อโลหะก่อให้เกิดวานาเดียมคาร์ไบด์แพร่กระจายเรียงตัวเป็นชั้นอย่างต่อเนื่องตามผิว ส่งผลให้ผิวชิ้นงานโลหะที่ปรับปรุงสภาพผิวมีความแข็ง เป็นการเพิ่มความสามารถในการป้องกันการขีดสี ขูดขีด โดยปกติชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาประมาณ 5 ถึง 10 μm ขึ้นกับเวลาในการปรับปรุงสภาพผิว อุณหภูมิการอบชุบ และส่วนผสมของ

วัสดุที่ต้องการปรับสภาพผิว หลังการปรับสภาพผิวกระบวนการนี้จำเป็นต้องตามด้วยการชุบแข็ง (Harding) และการอบคืนไฟ (Tempering) เพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติทางกลเดิมของเนื้อวัสดุด้วย[14]

กระบวนการไนไตรต์ดิงเป็นวิธีปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานให้มีความแข็งขึ้น โดยชิ้นงานจะถูกทิ้งไว้ในเตาอบภายใต้บรรยากาศแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ภายในเตาจะใช้อุณหภูมิประมาณ 500-550 °C เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้แก๊สแอมโมเนียสลายตัวเป็นไฮโดรเจน (Hydrogen; H) และไนโตรเจน ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจะแพร่ซึมเข้าไปในผิวชิ้นงานเกิดเป็นชั้นความแข็งประมาณ 1050 ถึง 1100 HV หนาประมาณ 25 ถึง 750 μm แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ มักจะเกิดชั้นความแข็งเปราะ (Brittle compound layer) ร่วมกับชั้นไนไตรต์ที่ผิวชิ้นงานด้วย ทำให้ต้องเจียรนัยผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้ทิ้งเพื่อให้ผิวไม่เปราะแตกง่าย [14, 17, 18]

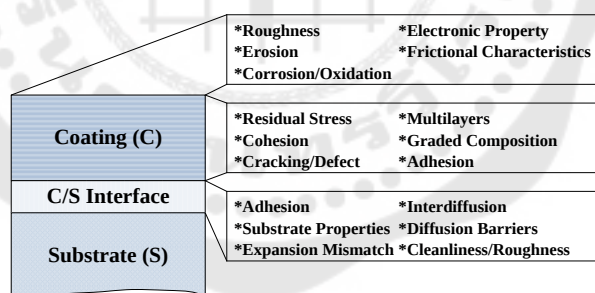
จากปัญหาการเกิดชั้นความแข็งเปราะที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไนไตรต์ดิง จึงมีการคิดค้นวิธีการเรดิคัลไนไตรต์ดิง (Radical nitriding) หรือ พลาสมาเรดิคัลไนไตรต์ดิง หลังจากกระบวนการนี้จึงไม่จำเป็นต้องนำชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวไปเจียรนัยเพิ่มทิ้งเพื่อให้ความหยาบผิวอันเนื่องจากการปรับสภาพผิวลดลง หรือเพื่อกำจัดชั้นความแข็งเปราะหลังการทำไนไตรต์ดิง ทำให้วิธีการนี้ได้รับความนิยมใช้ในการปรับสภาพผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิดอื่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มแข็งกับผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบฟิล์มแข็ง ซึ่งทำให้สามารถเคลือบฟิล์มแข็งหลังการปรับสภาพผิวได้ทันที [14]

2.4.3.2 การเคลือบผิว (Surface coating deposition) หมายถึง การนำเอาวัสดุอื่นมาเคลือบติดกับผิวชิ้นงานเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ วัสดุที่นิยมใช้เคลือบสำหรับงานทางวิศวกรรมในปัจจุบันได้แก่ ฟิล์มแข็งบาง (Hard thin film) โดยการเคลือบสามารถทำได้ด้วยกรรมวิธีไอทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) และวิธีไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition, PVD) ที่วิธีการทั้งสองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [14-18]

1. การเคลือบผิวด้วยไอเคมี เป็นกรรมวิธีการผลิตฟิล์มบางของโลหะเกือบทุกชนิดและโลหะอีกหลายประเภท โดยเฉพาะสารประกอบออกไซด์ คาร์ไบด์ และไนไตรด์ กรรมวิธีนี้จัดเป็นกรรมวิธีการเคลือบผิวที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารในสถานะที่เป็นไอ แก๊สกับของแข็งวัสดุพื้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิ ความดันและเงื่อนไขอุณหภูมิที่เหมาะสม ประเภทของแก๊สที่ถูกป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับผิวเคลือบที่ต้องการซึ่งจะเปลี่ยนไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งาน เช่น การเคลือบสารกึ่งตัวนำ การเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน และการเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอ เป็นที่นิยมในการเคลือบผิวเพือง ลูกปืน วาล์ว แม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติก และโลหะ และ เนื่องจากการเป็นการทำปฏิกิริยาของสารในสถานะแก๊สทำให้สามารถที่จะแพร่เข้าไปใน

เนื้อวัสดุพื้นได้ง่ายจึงทำให้เคลือบผิวชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ มีความสม่ำเสมอในชั้นฟิล์มดีโดยผิวฟิล์มที่ได้จากกรรมวิธีนี้จะจัดเป็นฟิล์มบางเนื่องจากมักจะได้อายุผิวฟิล์มเฉลี่ย 5-10 μm มีการยึดเกาะติดของชั้นฟิล์มกับผิววัสดุพื้นแข็งแรงดี แต่มีข้อจำกัดในการทำงานซึ่งต้องทำที่อุณหภูมิสูง เวลานาน ซึ่งอาจจะเกิดการบิดตัวของชิ้นงานมากหลังเคลือบ จำเป็นต้องทำผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อลดความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิหลังการเคลือบผิว และที่สำคัญสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการมักเป็นสารพิษที่อันตราย อีกทั้งผลิตผลพลอยได้จากกระบวนการมักจะเป็นพิษ ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและจัดเก็บ

2. การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ จัดเป็นกรรมวิธีเคลือบสารลงบนชิ้นงานโดยใช้กรรมวิธีทางฟิสิกส์ทำให้สารกลายเป็นไอแก๊ส (Evaporation) หรือเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาแล้วจึงทำให้เข้าไปฝังตัวลงในเนื้อวัสดุ (Sputtering) ด้วยวิธีกายไต้เงื่อนไขสภาวะสุญญากาศ ในกรณีที่จะเคลือบสารประกอบบางชนิดนั้นจะทำได้โดยการจ่ายแก๊สปฏิกิริยาเข้าร่วมตัวกับไอสารเพื่อให้ได้สารประกอบนั้นขึ้นมา ปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวต่ำกว่ากระบวนการ CVD จึงทำให้ขนาดและโครงสร้างของชิ้นงานที่เคลือบผิวไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 14 สมบัติที่ต้องการในการเคลือบฟิล์มแข็ง

ที่มา ภาสพิรุฬห์, (2552). การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. In: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. [14]

ภาพประกอบ 14 แสดงสมบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเคลือบฟิล์มแข็งบนชิ้นงานที่ต้องการเคลือบซึ่งอาจเรียกว่าวัสดุพื้น (Substrate) ในงานขึ้นรูปโลหะจะใช้ส่วนของฟิล์มเคลือบตัวบนทำหน้าที่เพิ่มสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น ลักษณะของความเสียดทาน เป็นต้น ปัจจุบันมีการเคลือบหรือปรับสภาพผิวของวัสดุชิ้นงานก่อนการเคลือบฟิล์มที่ต้องการ

ใช้จริง เพื่อเพิ่มความความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มกับผิวแม่พิมพ์ที่ทำการเคลือบผิว (Adhesive strength or Bond strength) เป็นต้น ซึ่งปัจจัยทั้งสองส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะและคุณภาพผิวของชิ้นงานขึ้นรูป

จากสมบัติในภาพประกอบ 15 ทำให้ในระยะสิบปีที่ผ่านมาฟิล์ม PVD ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถใช้ในงานที่เกิดแรงดันสัมผัสสูงได้โดยเพิ่มความความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มกับผิวชิ้นงานเคลือบอย่างฟิล์มในกลุ่ม Duplex ปรับสภาพผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบก่อนโดยใช้เรดคัลไนไตรด์ดิ่งแล้วจึงเคลือบฟิล์ม PVD ที่ต้องการทับอีกที วิธีการนี้ส่งผลให้ฟิล์ม PVD มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบเพิ่มขึ้น [18]

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิมในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพบรรยากาศทั่วไป ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิม คือ โครเมียม (Chromium; Cr) ที่ต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก (11 wt% Cr) โดยที่ความต้านทานการกัดกร่อนอาจเพิ่มขึ้นโดยการเติม निकิล (Nickel; N) และโมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo) โดยสามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มหลักตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม เฟอริติก (Ferritic) ออสเทนนิติก (Austenitic) และมาร์เทนซิติก (Martensitic) [12]

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอริติกเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมดมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ทำให้ยังคงมีสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติด ไม่สามารถทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งเป็นผลจากการเติมธาตุ निकิลหรือธาตุแมงกานีส (Manganese; Mn) ซึ่งขึ้นอยู่กับเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการยืดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ ทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่า อีกทั้งโครงสร้างออสเทนไนต์ยังเป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ แต่กรณีที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกถูกขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างก็จะทำให้บริเวณที่ถูกขึ้นรูปมีสมบัติที่ทำให้แม่เหล็กดูดติดได้ เนื่องจากโครงสร้างบริเวณที่ถูกขึ้นรูปจะเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างออสเทนไนต์แล้ว และสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะคล้ายกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอริติกแต่จะมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สูงกว่า ทำให้สามารถชุบแข็งได้ โครงสร้างจุลภาคหลังการชุบแข็งจะเป็นแบบมาร์เทนไซต์

(Martensite) ด้วยปริมาณคาร์บอนที่สูงจึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ลดลง [12, 19]

นอกจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มหลักข้างต้นแล้ว ยังมีเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มที่มีสองเฟส (Duplex) ซึ่งมีลักษณะร่วมทางโครงสร้างจุลภาคระหว่างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดจากการมีปริมาณของธาตุไนเกิลไม่ถึงร้อยละ 8 และมีปริมาณของธาตุโครเมียมสูงกว่าร้อยละ 20 ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ [19, 20] สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มสุดท้ายได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation hardening) เนื่องจากมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงจากเกิดการตกผลึกของเฟสต่างๆ จึงไม่นิยมใช้ในงานขึ้นรูปโลหะ อย่างไรก็ตามวัสดุนี้มีสมบัติทางกลที่หลากหลายและมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย

ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้งานแบ่งตามโครงสร้างได้แก่ เฟอร์ริติก: เกรด AISI430, AISI446 และ AISI409 ออสเทนนิติก: เกรด AISI304 และ AISI316 มาร์เทนซิติก: เกรด AISI410 และ AISI 440A

2.6 งานวิจัยเกี่ยวข้อง

จากปัญหาที่ภาคอุตสาหกรรมได้ทำการสำรวจพบว่าการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm นั้นเกิดรอยขีดข่วนในระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีรูปร่างและรูปทรงตามที่ต้องการสำหรับชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ จึงมีความต้องการหาวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าว ดังนั้นผู้วิจัยมีความต้องการศึกษาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานและตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่มีต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุและสมบัติทางไทรบอลโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์และวัสดุขึ้นงาน เพื่อทำการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปในขนาดที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ทดสอบแก้ไขปัญหาล้างตรงตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว เพื่อเป็นการหาข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้ประกอบการทำวิจัย ผู้วิจัยจึงสำรวจและทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางและต่อยอดงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สัญญา คำจริง และคณะ [5] ศึกษาปัญหาการลากแผ่นขึ้นงานเริ่มต้น (Blank) ที่ถูกเตรียมจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด SPFC980Y ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Lathe) แบบ 3 แกน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นเท่ากับ 81.08 มิลลิเมตร โดยใช้

อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (β) เท่ากับ 1.76 ตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่สำคัญ 3 ตัวแปรหลัก ได้แก่ ช่องว่างระหว่างพันธกับด้ายหรือเคลือบแรนซ์ (Clearance) ของแม่พิมพ์ รัศมีด้าย และแรงกดของตัวจับยึดชิ้นงาน (Blankholder force) ถูกใช้ในการศึกษา ผลการทดลองถูกเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC จากการศึกษาพบว่าแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่มีรัศมีด้ายน้อยมากไม่สามารถลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษได้สำเร็จ เนื่องจากตัวชิ้นงานจะเกิดรอยย่น และ/หรือ เกิดรอยแตก รัศมีด้ายที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 8 มิลลิเมตร การใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมในกรณีการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น เกรด SPCC ที่แม่พิมพ์มีรัศมีด้ายน้อยช่วยให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จ

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เกรด SUS304 เมื่อถูกขึ้นรูปเย็น บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจะมีโครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนจากโครงสร้างเดิมไปเป็นมาร์เทนไซต์ส่งผลให้ชิ้นงานแผ่นเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป [20-22] ทั้งนี้ความหนาของผนังด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 ที่ถูกลากขึ้นรูปด้วยการใช้น้ำมันหล่อลื่นกับไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่น ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [22]

ณัฐชานันท์ และภาสพิรุฬห์ [23] ประเมินสารหล่อลื่นในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียม A1100-O ด้วยเครื่องไตรบอไมเตอร์โดยวิธีบอลหมุนบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ตามมาตรฐาน ASTM G99 การทดสอบออกแบบให้บอลทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร แทนวัสดุแม่พิมพ์ซึ่งทำจากเหล็กกล้า เครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเช่นเดียวกับแม่พิมพ์ วัดค่าความแข็งได้เท่ากับ 59.8 HRC แล้วทำการขัดผิวให้มีค่าความหยาบผิว Ra เท่ากับ 0.0572 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป ทั้งนี้วัสดุชิ้นงานอลูมิเนียมแผ่น เกรด A-1100 ความหนา 1 มิลลิเมตร ถูกเตรียมเป็นแผ่นจานทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่าสารหล่อลื่นสำหรับงานขึ้นรูปโลหะมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยได้ค่า LDR มากกว่ากรณีไม่ใช้ สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นชนิดอื่นที่ทำการศึกษา ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์ เกรด SKD11 และวัสดุชิ้นงานอลูมิเนียม เกรด A1100-O ด้วยไตรบอไมเตอร์ การลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปโลหะ และเพิ่มคุณภาพผิว ของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามสารหล่อลื่นสำหรับงานขึ้นรูปโลหะมีราคาสูงกว่าสารหล่อลื่นสำหรับงานไฮดรอลิกส์และจากธรรมชาติอยู่ 2 และ 4 เท่า ตามลำดับ

RAJU et al. [24] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียมเกรด AA6061 โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย แรงจับยึดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น รัศมีมุมด้าย และรัศมีมุมพันธ์ จาก

การศึกษาพบว่าวัสดุที่มีมุมตายมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นชิ้นงานมากที่สุด รองมาคือ แรงจับยึดชิ้นงาน และวัสดุมีมุมพันธ์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Padmanabhan et al. [25] ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อการลดความหนาของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และเทคนิคทาคุชิ (Tagushi technique) โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย แรงจับยึดแผ่นชิ้นงาน วัสดุมีมุมตาย และแรงเสียดทานระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับผิวของวัสดุชิ้นงาน โดยผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีมุมตายมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุด รองมาคือ แรงเสียดทานระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับผิวของวัสดุชิ้นงาน และ แรงจับยึดชิ้นงาน ตามลำดับ ทั้งนี้ความสามารถในการลากขึ้นรูปชิ้นงานนอกจากเพิ่มได้โดยการปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสผิวของแม่พิมพ์กับผิวของวัสดุชิ้นงานแล้ว Lin et al. [26] ปรับปรุงความสามารถในการลากขึ้นรูป Cooper alloy) โดยการใช้พันธพิเศษที่มีการทำ Micro-rides ที่ผิวของพันธ์ เนื่องจากสามารถลดการลดลงของความหนาชิ้นงานที่บริเวณมุมพันธ์ได้

นอกจากปัญหาเรื่องความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแล้ว การเกิดการยึดติด (Adhesion) ยังเป็นปัญหาหลักในการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งงานวิจัยบางส่วน [27-36] ใช้การเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งทำให้สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ โดยในปี 1995, Murakawa et al. [27] ใช้ฟิล์ม Diamond-like carbon (DLC) เคลือบบนผิวแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป เพื่อลากขึ้นรูปชิ้นงานอลูมิเนียมแผ่นความหนา 1 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น จากการศึกษาพบว่า แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่เคลือบฟิล์ม DLC สามารถลากขึ้นรูปด้วยสปีดเฉลี่ยวัสดุทำจากอลูมิเนียมเกรด A5000 ได้สำเร็จมากกว่า 6,200 ถ้วย โดยที่ผิวของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปยังคงไม่เกิดการยึดติด (Adhesion) จากเศษวัสดุชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป ในขณะที่การลากขึ้นรูปชิ้นงานอลูมิเนียมแผ่นที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์ม DLC สามารถลากขึ้นรูปด้วยสปีดเฉลี่ยได้เพียง 5 ถ้วย ก็จะมีการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ ส่งผลให้การลากขึ้นรูปชิ้นงานถัดไปเกิดการแตกของถ้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horiuchi et al [28] ในขณะที่ Sato & Besshi [29] รายงานผลการศึกษาการใช้ฟิล์มแข็งในการเคลือบผิวแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด SKD11 เพื่อป้องกันการเกิดการยึดติดในการพับขึ้นรูปตัวยู (U-bending) วัสดุอลูมิเนียมผสม เกรด 5052 และ 1050 โดยผลการศึกษาพบว่าฟิล์ม TiC, TiN และ CrN สามารถลดการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด SKD11 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดของแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งยังน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cement carbide) นอกจากนี้ Sato et al. [30] ใช้การทดลองพับขึ้นรูปตัวยูทดสอบ

ประสิทธิภาพของฟิล์ม DLC ที่เคลือบบนวัสดุทำผิวชนิดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มี MoB เซอร์เมทเป็นพื้นฐาน (MoB-base cermet cemented carbide) ในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ ผลการทดสอบพบว่าฟิล์ม DLC มีประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ได้ดี

Podgornik et al. [31] ศึกษาอิทธิพลของความหนาผิววัสดุทำแม่พิมพ์ VANADIS 4 ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 บนผิวแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งบาง จากการศึกษพบว่า การเตรียมผิววัสดุทำแม่พิมพ์ที่เรียบกว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งได้ โดยฟิล์ม DLC ในกลุ่มของทังสเตนคาร์ไบด์ (WC/C) ให้ประสิทธิภาพในการป้องกันวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 มาติดบนผิวแม่พิมพ์ได้ดีที่สุด แต่ในกรณีการขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นอย่างนั้น Abe et al. [32] ได้พัฒนาสมบัติทางพื้นผิวของแม่พิมพ์รีดขึ้นรูป (Ironing) วัสดุขึ้นงานอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านการสร้างหลุมละเอียดกักน้ำมัน (Fine lubricant pockets) บนผิวแม่พิมพ์บริเวณผิวของหน้าตายที่ใช้ขึ้นรูป (Die land) ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ได้ดี โดยเฉพาะการใช้เทคนิคดังกล่าวร่วมกับ TiCN-cermet die และการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นธรรมชาติ (Mineral oil)

Kataoka et al. [33] ใช้วัสดุทำแม่พิมพ์จากเซรามิคซึ่งประกอบด้วย Alumina (Al_2O_3), zirconia (ZrO_2), silicon carbide (SiC) และ silicon nitride (Si_3N_4) เพื่อทดสอบหาค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Limiting drawing ratio; LDR) ของโลหะแผ่นชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า LDR ในการทดสอบการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกับวัสดุทำแม่พิมพ์จากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 พบว่า แม่พิมพ์ที่ทำจากเซรามิคให้ค่า LDR สูงกว่า อีกทั้งยังพบการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ช้ากว่าด้วย ในปี 2006, Podgornik et al. [34] ใช้ฟิล์มเคลือบแข็ง TiN, TiB_2 , VN, TaC และ DLC เคลือบบนเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น VANADIS 4 ด้วยกระบวนการไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition; PVD) ทดสอบความสามารถในการป้องกันการเกิดการยึดติดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ไททาเนียมผสม Ti6Al4V และอลูมิเนียมผสม Al98Mn1Mg1 จากการศึกษพบว่าฟิล์มเคลือบแข็งกลุ่มที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน (Carbon-based coatings) มีความสามารถในการป้องกันการเกิดการยึดติดได้ดีสำหรับการทดสอบกับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ฟิล์มกลุ่มไนไตรด์ (Nitride) เหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นรูปวัสดุที่ง่ายต่อการเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) อย่างอลูมิเนียมผสม ส่วนวัสดุที่มีความ

แข็งอย่างไททานเนียมผสมที่เกิดการยึดติดบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ได้ง่ายมีเพียงฟิล์มวัสดุทำแม่พิมพ์ที่ผ่านการทำพลาสมาไนไตรด์ (Plasma nitriding) แล้วเคลือบด้วยฟิล์มแข็งวานาเดียมไนไตรด์ (VN) เท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการลดปัญหาการเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ได้ ในขณะที่ Kim et al. [35] ประเมินประสิทธิภาพของวัสดุทำเครื่องมือ สารหล่อลื่น และฟิล์มเคลือบแข็ง ในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced high strength steels; AHSS) เคลือบกับกลาไนซ์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกชนิดของวัสดุทำเครื่องมือ สารหล่อลื่น และฟิล์มที่เหมาะสมในการป้องกันการเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มเคลือบแข็ง TiCN มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเคลือบแข็งชนิดอื่น ในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ได้

ในปี 2009, Sresomroeng et al. [36] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เกรด SKD11 ที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steels; HSS) รีดร้อนเกรด SPFH590 ด้วยการทดสอบ Ball-on-Disk เพื่อเลือกฟิล์มเคลือบแข็งที่มีสมบัติทางไทรบอโลยีที่เหมาะสมไปทดสอบการพัวขึ้นรูปตัวยู จากการศึกษพบว่าฟิล์มเคลือบแข็ง TiCN ที่เคลือบด้วยกระบวนการ CVD มีสมบัติทางไทรบอโลยีดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเคลือบแข็งชนิดอื่นที่ศึกษา คือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ระหว่างผิวคู่สัมผัสต่ำสุดและมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ของวัสดุแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งดังกล่าวต่ำที่สุด เมื่อนำไปทดสอบขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SPFH590 พบว่ามีประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์มากกว่า 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์พัวขึ้นรูปตัวยูที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง ต่อมาในปี 2010, Sresomroeng et al. [37] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์ม DLC และรายงานว่ฟิล์มดังกล่าวมีสมบัติทางไทรบอโลยีที่ดีโดยเฉพาะการมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มชนิดอื่น แต่จากผลการทดสอบฟิล์มดังกล่าวในกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการพัวขึ้นรูปตัวยูพบว่าฟิล์มดังกล่าวเกิดการหลุดลอกเนื่องจากในกระบวนการพัวขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกิดความดันที่ผิวสัมผัส (Contact pressure) สูง ทั้งนี้ Sresomroeng et al. [38] ได้ใช้ฟิล์มเคลือบ CrN ที่เพิ่มความแข็งแรงในการยึดติด (Adhesive strength or Bonding strength) ของฟิล์มเคลือบแข็งกับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ด้วยกระบวนการ Radical nitriding ให้กับแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด SPFC 980Y ทำให้สามารถใช้ฟิล์มแข็ง CrN ในการ

ป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานด้วยจำนวนการปั๊มขึ้นรูป (Shot) ที่มากขึ้น หลังจากนั้นก็มีนักวิจัยมุ่งใช้ฟิล์มเคลือบแข็งชนิดอื่นแก้ปัญหการยึดติดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เช่น Choi et al. [39] ปรับปรุงสมรรถนะให้กับวัสดุทำแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด AISI D2 ในการป้องกันการยึดติดของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ 980 ด้วยการใช้ฟิล์มแข็ง TiAlCrN เคลือบผิว ในขณะที่ Abe et al. [40] รายงานว่าแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 แล้วเคลือบด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์ (VC) ด้วยกระบวนการ Thermal diffusion (TD) มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด 1180 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wang et al. [41] ที่ใช้ VC coating กับวัสดุทำแม่พิมพ์ DC53 เพื่อป้องกันการยึดติดของวัสดุ DP600 ในการทดสอบด้วยไทรบอมิเตอร์ในการทดสอบดึงแผ่นสตริปที่สร้างขึ้นเอง (Custom-designed sheet strip tribo-tester)

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าผลผลิตขึ้นงานจากโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปนั้น ตัวแปรของกระบวนการที่สำคัญต่อความสำเร็จได้แก่ รัศมีมุมตาย รัศมีมุมพันซ์ แรงจับยึดแผ่นขึ้นงาน และสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส การตรวจสอบความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นสามารถทำได้โดยการใช้การลากขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นถ้วยทรงกระบอก โดยทดสอบจะใช้ขนาดของแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน แล้วทำการพิจารณาค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (LDR) อย่างไรก็ดีค่า LDR ของโลหะแผ่นสามารถเพิ่มขึ้นได้จากการปรับปรุงสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพ และการใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์ เป็นต้น แม้ว่าการขึ้นรูปเย็นโลหะแผ่นโดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีแนวโน้มความรุนแรงในการเกิดปัญหาการยึดติดบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น การใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเครื่องมือมีแนวโน้มแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่การศึกษาที่ผ่านมายังขาดมุมมองจนถึงกลไกการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุขึ้นงานในงานขึ้นรูปเย็น [42] โดยเฉพาะการใช้ฟิล์มแข็ง (Solid films) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไทรบอโลยีให้แก่ผิวเครื่องมือขึ้นรูปโลหะซึ่งถือเป็นต้นทุนการผลิตอย่างหนึ่ง อีกทั้งปัจจุบันมีหลายชนิดฟิล์มให้เลือกใช้ซึ่งแต่ละชนิดก็สามารถใช้ได้ดีกับแต่ละชนิดของวัสดุขึ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป [38] ดังนั้นการเลือกชนิดของฟิล์มเคลือบแข็งที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป และการเลือกใช้ตัวแปรของกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบกระบวนการหรือควบคุมกระบวนการต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมเพื่อให้สามารถผลิตขึ้นงานโลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยมุ่งเน้นศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะแผ่นชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุและสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสแม่พิมพ์กับชิ้นงาน โดยเฉพาะการแก้ปัญหาการเกิดรอยครูดบนชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องทำการศึกษา เก็บข้อมูลในการวิจัย และทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัย โดยมีองค์ประกอบขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1.1 การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานด้วยการทดสอบแรงดึง อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM [11] สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานที่ทดสอบหาค่าได้แก่ ความเค้นคราก ความเค้นสูงสุด เส้นโค้งการไหลตัว (Flow curve) และค่า R-value ของวัสดุชิ้นงาน

3.1.2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน อ้างอิงงานวิจัยของ Lade et al. [43]

3.1.3 การศึกษาสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a และ ASTM G133-05 [44] และอ้างอิงงานวิจัยของณัฐชานันท์ และภาสพิรุฬห์ [23]

3.1.4 การศึกษาขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป อ้างอิงงานวิจัยของ Raju et al. [24] และงานวิจัยของ Padmanabhan et al. [25]

3.1.5 การศึกษาขนาดของรัศมีตายที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป อ้างอิงงานวิจัยของ Raju et al. [24] และงานวิจัยของ Padmanabhan et al. [25]

3.1.6 การศึกษาขนาดขององศามุมพื้นที่ที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป

3.1.7 การประเมินค่าความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน อ้างอิงงานวิจัยของณัฐชานันท์ และภาสพิรุฬห์ [23] และงานวิจัยของ Lin et al. [26]

3.1.8 เปรียบเทียบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ภายใต้ผิวคู่สัมผัสระหว่างวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานตามขอบเขตที่ศึกษาเพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน โดยอ้างอิงงานวิจัยของณัฐชานันท์ และภาสพิรุฬห์ [23]

3.2 เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และระเบียบวิธีวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้สามารถแบ่งได้สามส่วนคือ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวัดผลทางกระบวนการขึ้นรูปโลหะ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน และเครื่องมือในการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส ในการทำวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีขึ้นรูปโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (Tool and Die Technology Center: TDTTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี ซึ่งเป็นสถานที่หลักในการทำการทดลอง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ไปทำการเก็บข้อมูลจริงในภาคอุตสาหกรรมซึ่งเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนจักรยานยนต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบสมบัติทางกลของโลหะแผ่นขึ้นงานด้วยการทดสอบด้วย

แรงดึงแบบแกนเดียว

ในการทดสอบการดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานที่จะใช้สำหรับการทดลอง ผู้วิจัยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E8 หรือเทียบเคียงมาตรฐานการทดสอบ JIS : Z 2201 ในการเตรียมขนาดชิ้นงานทดสอบโดยจะใช้ตารางที่ 3 ในการเลือกขนาดชิ้นงาน

ตาราง 3 รูปร่างและความหนาของชิ้นงานทดสอบ

Product		Test Piece		Remark
Form	Dimensions	Proportional	Non-proportional	
Plate, Sheet, Strip	Over 40 mm in Thickness	No.14 A	No. 4, No. 10	For Bar form Test Piece
		No.14 B	-	For Flat form Test Piece

ตาราง 3 (ต่อ)

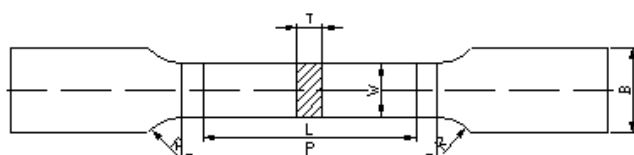
Product		Test Piece		Remark
Form	Dimensions	Proportional	Non-proportional	
Plate, Sheet, Strip	Over 20 mm to 40 mm in Thickness	No.14 A	No. 4, No. 10	For Bar form Test Piece
		No.14 B	No. 1 A	For Flat form Test Piece
	Over 6 mm to 20 mm in Thickness	No.14 B	No. 1 A, No.5	
	Over 3 mm to 6 mm in Thickness	-	No. 5, No. 13 A, No. 13 B	For Flat form Test Piece
	Up to 3 mm in Thickness	-		

จากตาราง 3 โลหะแผ่นที่ศึกษาที่นำมาทำชิ้นทดสอบมีความหนาเท่ากับ 0.2 mm ผู้วิจัยจึงเลือกการทดสอบ No. 13 B ซึ่งมีลักษณะแบบ Non-proportional มีขนาดของชิ้นทดสอบเป็นไปตามรายละเอียดในตาราง 4

ผู้วิจัยใช้เทคนิคการตัดโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องไวร์ อีดีเอ็ม (Wire EDM) ยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น FA10S ดังภาพประกอบ 15 ตัดโลหะแผ่นที่ศึกษาเพื่อเตรียมเป็นชิ้น

ทดสอบ (Specimen) ตามข้อมูลจากตาราง 4 โดยที่ชิ้นทดสอบวัสดุ SUS304 BA ถูกเตรียมให้มีการทดสอบโดยใช้แรงดึงในแนวแกนเดียวตามทิศทางแนวรีด (Rolling direction) หรือ 0° กับทิศทางแนวรีด 45° กับทิศทางแนวรีด และ 90° กับทิศทางแนวรีดหรือขวางแนวรีด

ตาราง 4 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามรูปแบบ No. 13 B



Unit: mm

Type of Test Piece	Width (W)	Gauge Length (L)	Parallel Length (P)	Radius of Fillet (R)	Thickness (T)	Width of Gripped Portion (B)
13 B	12.5	50	60 approx.	20 to 30	Thickness of Material	20 min.



ภาพประกอบ 15 เครื่องไวร์ อีดีเอ็ม

การทดสอบโลหะแผ่นชิ้นงานด้วยแรงดึงทำที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu Autograph รุ่น AG-X plush ที่มีความสามารถให้แรงดึงสูงสุดได้ 100 kN มีความเร็วการให้แรงทดสอบในย่าน 0.00005 to 1500 mm/min มีความเที่ยงตรงในการวัดแรง $\pm 0.5 \%$

ความเครียดของชิ้นทดสอบถูกวัดด้วยอุปกรณ์วัดการยืดตัวของชิ้นทดสอบขณะรับภาระแรงดึงแบบดิจิทัลวีดีโอ (Digital video extensometer) รุ่น TRViewX มีความเที่ยงตรงเป็นไปตามมาตรฐาน JIS B7741 0.5 Class เครื่องทดสอบและอุปกรณ์ทั้งหมดต่อพ่วงกับชุดคอมพิวเตอร์และใช้ซอฟต์แวร์ TRAPEZIUM X ในการประมวลผลและรายงานผล การทดสอบทำโดยดึงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 จำนวน 3 ชิ้น ตามแต่ละทิศทางของแนวรีด แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ได้ซึ่งเป็นค่าสมบัติทางกลที่สำคัญของชิ้นทดสอบ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่ใช้ทดสอบด้วยแรงดึงและอุปกรณ์วัดการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์



ภาพประกอบ 17 เครื่องวัดความแข็ง

สำหรับการวัดความแข็งของวัสดุทำแม่พิมพ์หลังการชุบแข็ง (Hardening) โดยกรรมวิธีทางความร้อน ผู้วิจัยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบดิจิทัล (Digital Hardness Tester) ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น RMT-3 ดังภาพประกอบ 17 การทดสอบใช้หัวทดสอบแบบเพชร ด้วยแรงกดขนาด 150 kgf เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบในหน่วย Hardness Rockwell C (HRC)

3.2.2 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์

3.2.2.1 เครื่องทดสอบไทรบอมิเตอร์ (Tribometer) ยี่ห้อ Anton Paar ดังภาพประกอบ 18 เป็นเครื่องทดสอบทางไทรบอโลยีแบบบอลบนแผ่นจาน ใช้สำหรับทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างผิวคู่สัมผัสและการสึกหรอ โดยเครื่องทดสอบนี้จะต่อพ่วงเข้ากับคอมพิวเตอร์ซึ่งประมวลผลด้วยโปรแกรม InstrumX



ภาพประกอบ 18 เครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ชิ้นทดสอบ (Specimen) ถูกเตรียมให้มีขนาดกว้างและยาวเท่ากับ 10 mm โดยเตรียมจากวัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm ในขณะที่วัสดุทำแม่พิมพ์เกรด SKD11 ถูกเตรียมให้มีความหนาของชิ้นทดสอบเท่ากับ 5 mm การตรวจสอบธาตุจะกระทำกับชิ้นทดสอบวัสดุชิ้นงานและวัสดุทำแม่พิมพ์จำนวนละ 3 ตัวอย่าง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผล

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ในระดับจุลภาค ผู้วิจัยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning

Electron Microscope; SEM) ของบริษัท HITASHI แบบ Tabletop Microscope รุ่น TM-1000 ดังภาพประกอบ 19 โดยอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้มีความต่างศักย์ (Accelerating Voltage) 15kV มีกำลังขยาย (Magnification) ในย่าน 20 - 10,000x ภาพที่ได้จะเป็นภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image: BEI) ข้อได้เปรียบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่นนี้ คือ มีเวลาการตั้งเครื่อง (Setup time) เพียงแค่ 3 min ต่อการถ่ายภาพ 1 ครั้ง ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยทั่วไปจะใช้เวลาในการตั้งเครื่องมากถึง 20 min



ภาพประกอบ 19 ชุดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับลักษณะทางกายภาพของของฟิล์มแข็งและการตรวจสอบความหนาฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยเครื่อง HITASHI Tabletop Microscope TM-1000 เช่นเดียวกัน สำหรับการวัดความหนาของฟิล์มแข็งผู้วิจัยใช้ซอฟต์แวร์ของเครื่องในโหมดการวัดค่าเพื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มจำนวน 3 จุดต่อแต่ละชนิดฟิล์ม แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผลการวัดความหนาของฟิล์ม

โครงสร้างทางจุลภาค (Micro Structure) ของวัสดุขึ้นงานโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA และวัสดุทำแม่พิมพ์เกรด SKD11 ถูกตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพที่ กำลังขยายสูงจากชิ้นทดสอบ (Specimen) ขนาดกว้างและยาว 10 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้เห็นถึงลักษณะชนิดของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัด

กระดาษทราย ขัดละเอียดด้วยผ้าขัด แล้วผ่านการกัดกรดตามมาตรฐาน ASTM E 407 ซึ่งกรดที่ใช้ประกอบด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL)

3.2.3 การทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน

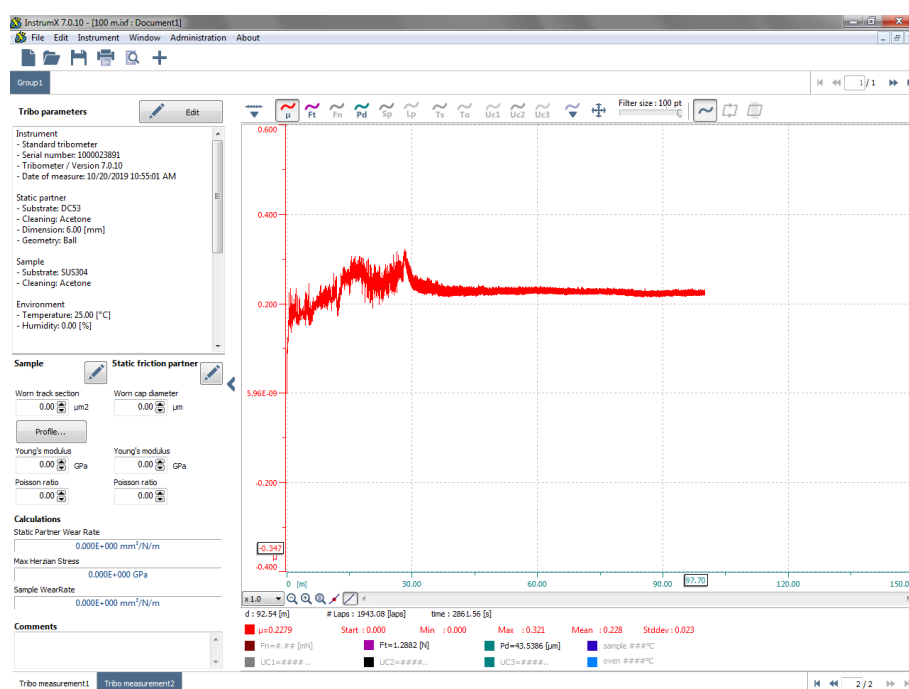
เครื่องทดสอบไทรบอมิเตอร์ (Tribometer) ยี่ห้อ Anton Paar (ภาพประกอบ 20) เป็นเครื่องทดสอบทางไทรบอโลยีที่สามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G99-95a ด้วยวิธีการทดสอบหมุดบนแผ่นจาน (Pin-on-Disk) หรือบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างผิวคู่สัมผัส โดยเครื่องไทรบอมิเตอร์นี้จะต่อพ่วงเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์ InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10 (ภาพประกอบ 21) เพื่อไว้ใช้สำหรับประมวลผลและรายงานผลในรูปของกราฟเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะทางการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวคู่สัมผัส ในงานวิจัยนี้กำหนดระยะทางการเคลื่อนที่สัมผัสเท่ากับ 100 m



ภาพประกอบ 20 เครื่องไทรบอมิเตอร์

ความเร็วในการเคลื่อนที่ระหว่างผิวคู่สัมผัส (Sliding velocity) ที่ศึกษามี 3 ระดับ ได้แก่ 50, 100 และ 150 mm/s ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วของช่วงใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป [32, 45, 46] (เช่น Bending, Deep drawing and Blanking operation) จากงานวิจัยที่ผ่านมาความดันที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัส (Contact pressure) ของวัสดุเครื่องมีกับ

โลหะแผ่นอาจมีค่าสูงถึง 1247 MPa [47] โดยเฉพาะกับวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ดังนั้นการทดสอบจึงใช้แรงกระทำตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัส (Normal load) 3 ระดับ คือ 2 N, 5 N และ 8 N เทียบเท่ากับความดันสัมผัส 807 MPa 1095 MPa และ 1280 MPa ตามสมการของ Hertzien [48] ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงใช้เพื่อเลือกเงื่อนไขของการทดสอบด้วยไทรบอมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a และ ASTM G133-05 ดังแสดงในตาราง 5

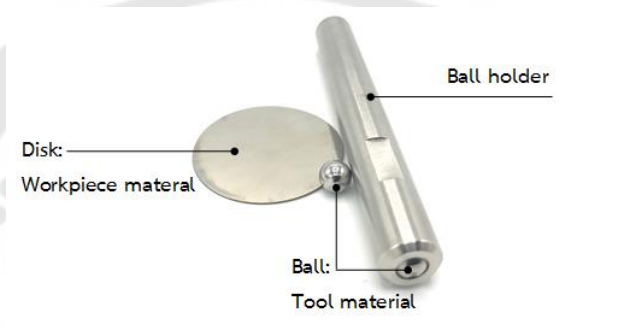


ภาพประกอบ 21 รายละเอียดการแสดงผลของซอฟต์แวร์ InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10

ตาราง 5 เงื่อนไขการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส

เงื่อนไขการทดสอบ	ค่า [หน่วย]	หมายเหตุ
แรงกระทำตั้งฉากการเคลื่อนที่	2, 5, 8 [N]	Normal load
ความเร็วการเคลื่อนที่	50, 100, 150 [mm/s]	
ระยะทางการเคลื่อนที่สัมผัส	100 [m]	
การเคลือบผิวบอล	DLC, CrN, TiN, TiCN, TiAlN	
สภาพการหล่อลื่น	Dry	ไม่ใช้สารหล่อลื่น และทำความสะอาดด้วย Acetone

บอลและแผ่นจานที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมด้านไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM G99-95a และ ASTM G133-05 โดยบอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ทำจากวัสดุ SKD11 ชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อน แล้วเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง 5 ชนิด ที่เคลือบด้วยกระบวนการ PVD ได้แก่ฟิล์ม DLC, CrN, TiN, TiCN และ TiAlN ตามขอบเขตที่กำหนดซึ่งเลือกจากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา ฟิล์มแข็งทั้งหมดใช้กระบวนการเคลือบผิวแบบ physical vapor deposition (PVD) ซึ่งมีรายงานว่า เป็นกระบวนการที่ได้ชั้นฟิล์มเรียบและบาง [49] จึงเหมาะกับการนำมาใช้เคลือบบนผิวแม่พิมพ์ที่ต้องการควบคุมขนาดให้อยู่ในค่าพิคัดความเผื่อ (Tolerance) หลังการเคลือบ



ภาพประกอบ 22 บอลและแผ่นจานที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมด้านไทรบอโลยี

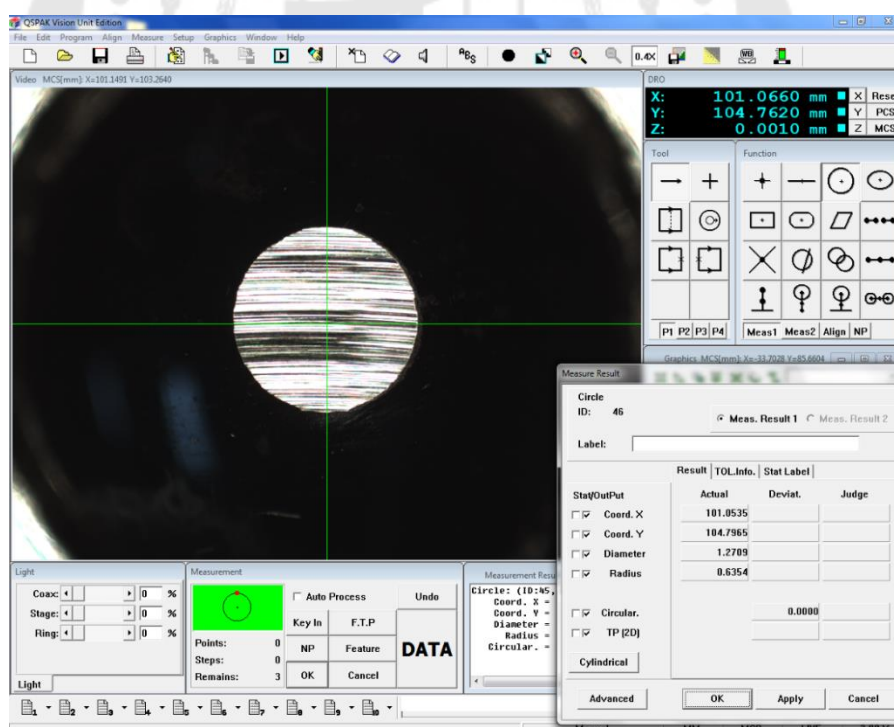
แผ่นจานทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA ถูกเตรียมจากการตัดด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องไวร์ อีดีเอ็ม (ภาพประกอบ 15) ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากับ 30 mm ลักษณะบอลและแผ่นจานที่ใช้ในการทดสอบหาสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส แสดงดังภาพประกอบ 22 ทั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้บอล (Ball) ทดสอบบนแผ่นจาน (Disk) แทนการใช้พิน (Pin) เนื่องจากสามารถคลายตัวยึดบอล (Ball holder) เพื่อหมุนเปลี่ยนตำแหน่งรอยสึกหรอของบอลที่เกิดจากการทดสอบไปยังผิวบอลที่ยังไม่เกิดรอยสึกหรอ แต่ถ้าเป็นกรณีการใช้พินทดสอบนั้นจะสามารถใช้การทดสอบกับพินดังกล่าวได้เพียงหนึ่งเงื่อนไขสำหรับการทดลองเท่านั้น

การตรวจสอบรอยสึกหรอของบอลจากการทดสอบ Ball-on-Disk ใช้ชุด Vision Unit ของ Mitutoyo รุ่น MF-B1010D (ภาพประกอบ 23) ซึ่งประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ต่อชุดซอฟต์แวร์ QSPAK Vision Unit ของ Mitutoyo ดังภาพประกอบ 24 ปริมาณการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวลูกบอลถูกประเมินจากร้อยละของพื้นที่การยึดติดซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ที่เกิดการยึดติดต่อพื้นที่ทั้งหมดของรอยสึกหรอบนผิวบอลคูณหนึ่งร้อย พื้นที่ทั้งหมดของรอยสึกหรอวัดจากภาพถ่ายที่ได้จาก Vision Unit แล้วใช้เทคนิค Image processing เพื่อประเมินพื้นที่ที่เกิด

การยืดติดด้วย Threshold Operation ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้ในการประเมินการยืดเกาะของวัสดุบนผิว
 คู่สัมผัสในงานวิจัยที่ผ่านมา[29, 30, 50]

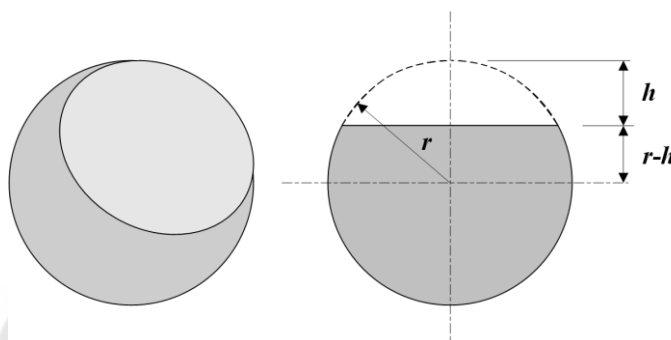


ภาพประกอบ 23 ชุดวัดรอยลึกหระของบอล



ภาพประกอบ 24 ลักษณะของซอฟต์แวร์ QSPAK Vision Unit และการวัดรอยลึกหระของบอล

ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะและตัวแปรในการวัดบอลทดสอบเพื่อหาปริมาณการสึกหรอ ที่ทุกๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m บอลจะถูกนำมาขยายรอยสึกหรอด้วยชุด Vision unit เพื่อถ่ายภาพและวัดรอยสึกหรอ ทั้งนี้ปริมาณการสึกหรอในรูปของปริมาตรสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.1) หรือสมการ (3.2) [14]



ภาพประกอบ 25 ลักษณะและตัวแปรในการวัดรอยสึกหรอของบอลที่ทดสอบด้วย Ball-on-Disk

$$V = \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \quad (3.1)$$

$$V = \pi h \left(\frac{s^2}{8} + \frac{h^2}{6} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรการสึกหรอ [mm^3]

r คือ รัศมีของบอลทดสอบ [mm]

s คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ [mm]

h คือ ความสูงจากส่วนโค้งของผิวลูกบอลจนถึงรอยสึกหรอ [mm]

ปริมาตรการสึกหรอที่วัดและคำนวณได้จะถูกนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับระยะทางการทดสอบ โดยการสึกหรอของบอลซึ่งมีแนวโน้มที่เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น (Linear) [14] ดังนั้นตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มาจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ R^2 (R-squared) หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination) โดยทั่วไปสมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 [51, 52] หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก หากมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวแปร

ต้นกับตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ หรือกรณีที่มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่มี ความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม

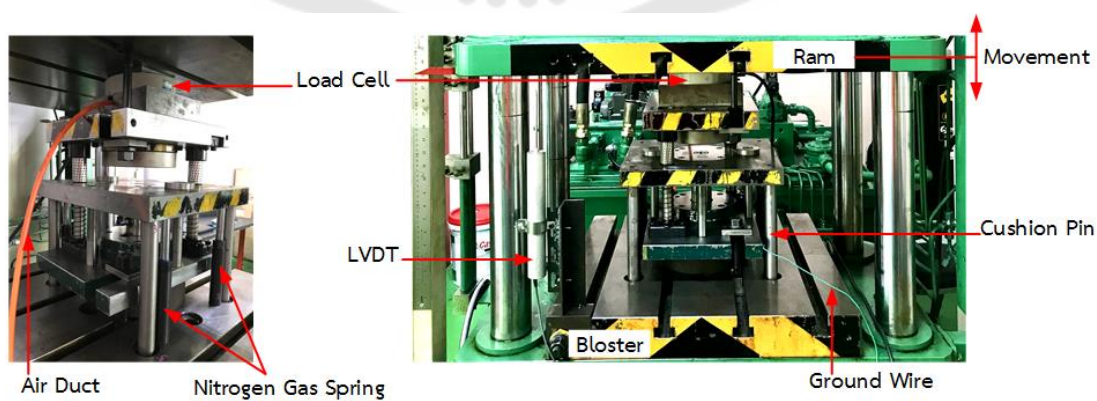
3.2.4 การทดลองลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

เครื่องเพรสไฮดรอลิก (Hydraulic press machine) ยี่ห้อ TMC รุ่น HSP80T ขนาด 800 kN ถูกใช้ในการให้แรงเพื่อลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้ในการทดลอง เครื่องเพรสนี้เป็น เครื่องเพรสแบบจังหวะเดียวทำงานด้วยระบบปั๊มไฮดรอลิกเป็นต้นกำลัง ดังภาพประกอบ 26

แม่พิมพ์ที่ถูกออกแบบ (ภาคผนวก ก) และสร้างขึ้นสำหรับการทดสอบลากขึ้นรูป จะถูกติดตั้งกับเครื่องเพรส โดยแม่พิมพ์ชุดบน (Upper die set) จะถูกติดตั้งกับแรม (Ram) ของ เครื่องเพรส ในขณะที่แม่พิมพ์ชุดล่าง (Lower die set) จะถูกติดตั้งกับแท่นจับยึดแม่พิมพ์หรือโบล สเตอร์ (Bolster) ของเครื่องเพรส และต่อพ่วงด้วยอุปกรณ์วัดแรง (Load cell) ขนาด 100 kN พร้อมสายส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดแรงในการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยทำการติดตั้ง อุปกรณ์วัดแรงที่แม่พิมพ์ชุดบน นอกจากการตรวจสอบแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้ว ระยะเวลาในการ เคลื่อนที่ของพังก์หรือระยะกดลึกลงของพังก์จะถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดระยะทาง (Linear variable differential transformer; LVDT) ในช่วง 100 mm ซึ่งครอบคลุมระยะการเคลื่อนที่ของพังก์ในการ ลากขึ้นรูปขึ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานวิจัยนี้ ทั้งอุปกรณ์วัดแรงและอุปกรณ์วัด ระยะทางจะถูกต่อพ่วงกับชุดประมวลผลข้อมูลยี่ห้อ KYOWA รุ่น EDX-100A ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่รับ สัญญาณจากเครื่องมือวัดในรูปสัญญาณแอนะล็อกแล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อบันทึก ข้อมูล เมื่อนำข้อมูลขนาดของแรงและระยะทางในการขึ้นรูปดังกล่าวมาพล็อตจะได้เป็นกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพังก์ ลักษณะการ ติดตั้งแม่พิมพ์และเครื่องมือวัดในกระบวนการลากขึ้นรูปแสดงดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 26 เครื่องเพรสแบบไฮดรอลิกขนาด 800 kN



ภาพประกอบ 27 ลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์และอุปกรณ์วัดในการทดสอบการลากขึ้นรูป

การตรวจสอบความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น อบอ่อน และปรับปรุงสภาพผิวให้มีความเงาพิเศษ เกรด SUS304 BA ที่ตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่สำคัญซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 16, 18] ได้แก่ ขนาดองศาของมุมพันซ์ (R_p) ขนาดรัศมีของมุมตาย (R_d) และแรงจับยึดขึ้นงาน (BHF) โดยใช้เกณฑ์การตรวจสอบจากค่าขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (LDR)

การเตรียมแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นสำหรับการทดสอบการลากขึ้นรูป ผู้วิจัยใช้วิธีการตัดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องไวร์ อีดีเอ็ม (ภาพประกอบ 15) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันตามกำหนด การทดสอบเทียบเคียงกับการผลิตชิ้นส่วนของบริษัทกรณีศึกษาโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดเดียวกับที่บริษัทกรณีศึกษาใช้ในการผลิตจริง ยี่ห้อ LUBE TECH เกรด G-3153 Stamping Oil และมีค่าของตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่ศึกษาเป็นไปตามขอบเขตการศึกษาที่กำหนดดังรายละเอียดในตาราง 6 ทั้งนี้การเตรียมโลหะแผ่นขึ้นงานก่อนการตัดเป็นแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นด้วยกระแสไฟฟ้า ผู้วิจัยได้เตรียมขึ้นงานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้เครื่องตัดเฉือนโลหะแผ่นซึ่งควบคุมด้วยตัวเลข (Numerical control; NC) ขนาด 800 กิโลนิวตัน ดังภาพประกอบ 28

ตาราง 6 ตัวแปรและค่าของตัวแปรในการทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

ตัวแปร	ค่า [หน่วย]	หมายเหตุ
ขนาดองศาของมุมพันซ์ (R_p)	0, 15, 30 [degree; (°)]	
ขนาดรัศมีของมุมตาย (R_d)	0.5, 1.5, 2.5 [mm]	
แรงจับยึดขึ้นงาน (BHF)	5.0, 8.0, 12.0 [kN]	ให้แรงคงที่โดยใช้ไนโตรเจนแก๊สสปริง (4 ตัว)
ความเร็วในการลากขึ้นรูป	7.0 [mm/sec]	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพันซ์	32.0 [mm]	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตาย	32.5 [mm]	

กรณีการทดลองลากขึ้นรูปขึ้นงานที่ใช้สารหล่อลื่น สารหล่อลื่นที่ใช้ได้แก่สารหล่อลื่นสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่นยี่ห้อ LUBETECH G-3153 โดยมีค่าความหนืด (Viscosity) เท่ากับ $53.73 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ (40°C) และในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นขึ้นงานเริ่มต้นจะถูกทำความสะอาดด้วย Acetone



ภาพประกอบ 28 เครื่องตัดเชื่อมโลหะแผ่น



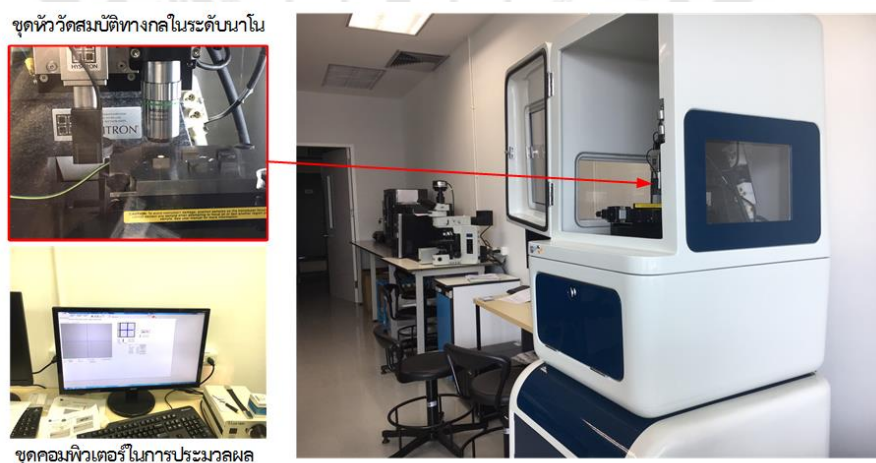
ภาพประกอบ 29 เครื่องมือวัดความหยาบผิว

การตรวจสอบความหยาบผิว (Surface roughness) ของวัสดุทำแม่พิมพ์ฟิล์มแข็ง วัสดุขึ้นงานเริ่มต้น และชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูป ผู้วิจัยใช้เครื่องมือวัดค่าความหยาบผิวแบบหัวเข็มหยั่งลาก (Stylus probe) ยี่ห้อ Mahr รุ่น Marsurf PS1 ดังภาพประกอบ 29 ซึ่งประกอบด้วยชุดจับชิ้นงาน (Fixture) ที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยเฉพาะเพื่อความเที่ยงตรงและสะดวกในการวัด ผู้ศึกษากำหนดระยะการทดสอบเท่ากับ 8.6 mm และมี Cut-off length เท่ากับ 0.8 mm ค่าที่วัดได้จากเครื่อง Marsurf PS1 จะมีความละเอียดระดับไมโครเมตร ค่าความหยาบผิวของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่ผ่านการขึ้นรูปและตกแต่งผิวด้วยเครื่องมือกล (Machine tool) ในงานวิจัยนี้ ผู้ศึกษากำหนดให้เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อน มีค่าความแข็ง

ในช่วง 60 ± 2 HRC ตบแต่งผิวให้มีค่าความหยาบผิว Arithmetic average roughness Ra เท่ากับ $0.1 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นไปตามช่วงใช้งานสำหรับแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา และค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้กับแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ [27, 53-56] และมีรายงานว่าค่าความหยาบผิว $0.1 \mu\text{m}$ ช่วยเพิ่มอายุของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 จากการยึดติดเมื่อเปรียบเทียบกับ การขัดผิวให้ราบเรียบกว่า [57] ทั้งนี้การทดสอบไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุขึ้นงาน ผู้วิจัยก็ควบคุมสมบัติของบอล SKD11 ให้มีค่าเป็นไปตามค่าดังกล่าว เพื่อให้เงื่อนไขการจำลองการทำงานทางไทรบอโลยีและการทดลองการลากขึ้นรูปมีเงื่อนไขของตัวแปรเดียวกัน

3.2.5 การทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง

เนื่องจากฟิล์มแข็งที่ศึกษามีความหนาน้อยมาก ซึ่งข้อมูลจากบริษัทรับเคลือบฟิล์มแข็งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีความหนาไม่เกิน $4 \mu\text{m}$ ดังนั้นในการทดสอบหรือวัดค่าสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง จำเป็นต้องใช้เครื่องที่มีความละเอียดสูง โดยผู้ศึกษาเลือกใช้เครื่องมือวัดสมบัติทางกลของวัสดุในระดับนาโน (Nano-mechanical testing instrument) ยี่ห้อ HYSITRON รุ่น Ti Premier ดังภาพประกอบ 30 โดยดำเนินการทดสอบ ณ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค) จังหวัดปทุมธานี



ภาพประกอบ 30 เครื่องมือวัดสมบัติทางกลของวัสดุในระดับนาโน

การทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ HYSITRON รุ่น Ti Premier จะได้ค่าความแข็งของฟิล์มที่ทดสอบในระดับนาโน การทดสอบนี้อาจเรียกว่าการกดในระดับนาโน (Nano-indentation testing) ทำโดยใช้หัวกดแบบ Berkovich ทรงปิ

รามิดกดลงบนผิวฟิล์มด้วยแรงกด 0-1000 μN แล้วประมวลผลด้วยโปรแกรม TriboScope เนื่องจากใช้แรงกดน้อยจึงทำให้ปลายของหัวกด กดเจาะลงไปบนเนื้อฟิล์มลึกไม่เกิน 1/10 ของความหนาฟิล์ม ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นสมบัติทางกลของฟิล์มโดยไม่มีอิทธิพลของวัสดุชิ้นงานที่ถูกเคลือบเข้ามาเกี่ยวข้อง

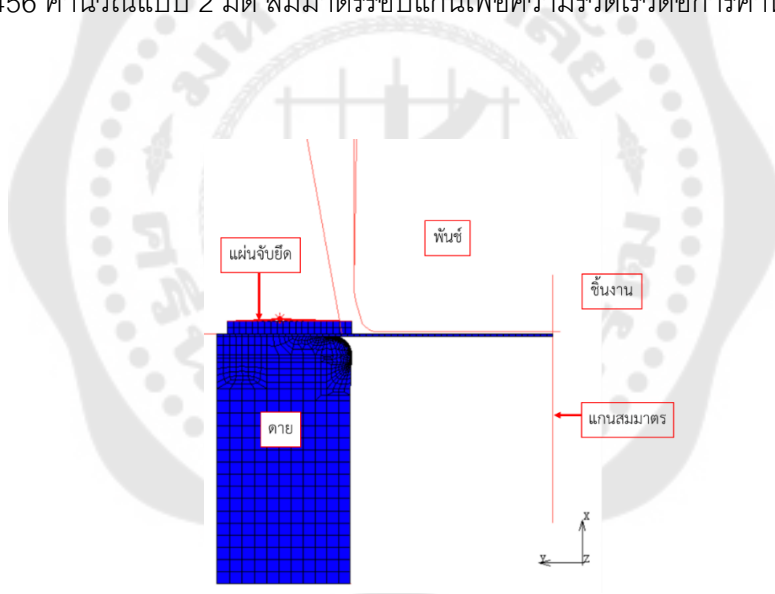
นอกจากสมบัติทางกลของฟิล์มแข็งที่ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ HYSITRON รุ่น Ti Premier แล้ว ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องดังกล่าวในการทดสอบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระดับนาโน (Nano-tribological) ของฟิล์มแข็งด้วย การทดสอบการขีดข่วน (Scratch Testing) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งในการยึดเกาะกับผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (Substrate) โดยหลักการของการทดสอบ คือ ฟิล์มจะได้รับแรงกดจากหัวทดสอบแบบ Rockwell ซึ่งแรงกดที่ให้ จะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหัวทดสอบ เงื่อนไขในการทดสอบแสดงไว้ในตาราง 7

ตาราง 7 เงื่อนไขของการทดสอบการขีดข่วน

เงื่อนไขของการทดสอบ	รายละเอียด
ชนิดของหัวทดสอบ	Diamond Cone (Rockwell)
รัศมีหัวลาก [μm]	200
แรงกด [μN]	0-10 (Linear Increasing)
ระยะทางในการลากทดสอบ [mm]	8.6
อัตราเร็วในการลากทดสอบ [mm/min]	10

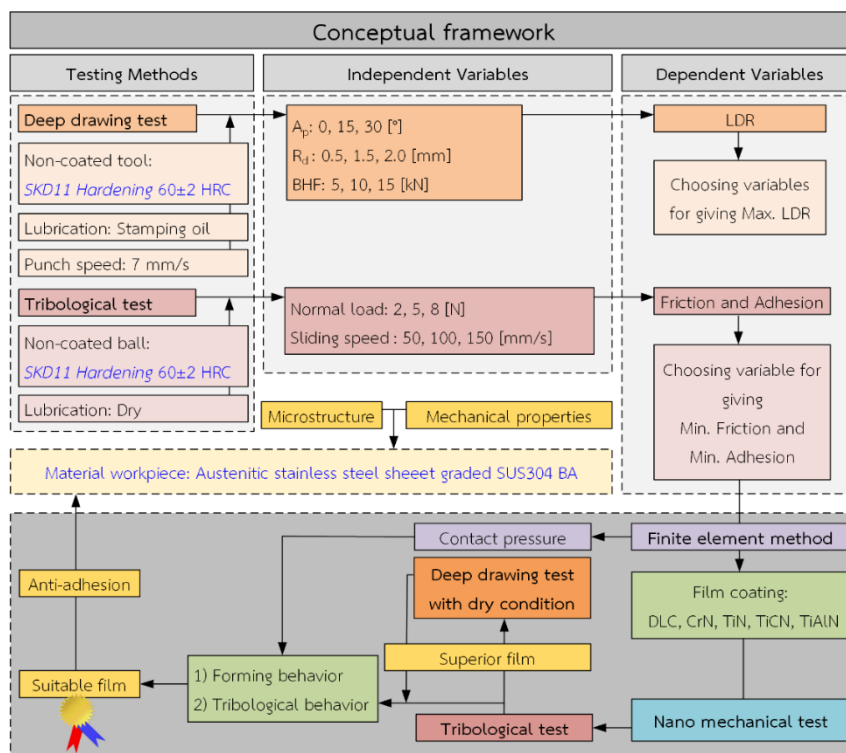
3.2.6 การจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการทำงานช่วยให้ทราบถึงกลไกการขึ้นรูป ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ การจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถือได้ว่าเป็นที่นิยมโดยเฉพาะการใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ซึ่งปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของชิ้นงานขึ้นรูปโลหะแล้วใช้ข้อมูลที่ได้ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์และขั้นตอนการขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้การจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปเพื่อเลือกแรงกระทำตั้งฉากการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสให้สอดคล้องกับตัวแปรในการทดลองลากขึ้นรูป โมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพประกอบ 31 มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 1272 และจำนวนโนดเท่ากับ 1456 คำนวณแบบ 2 มิติ สมมาตรรอบแกนเพื่อความรวดเร็วต่อการคำนวณ



ภาพประกอบ 31 โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากวิธีการดำเนินการข้างต้นรวมถึงการเลือกใช้เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เขียนสรุปกรอบแนวคิดการวิจัยและการทดสอบที่เลือกใช้อย่างภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 กรอบแนวคิดในการทำวิจัยและการทดสอบที่เลือกใช้

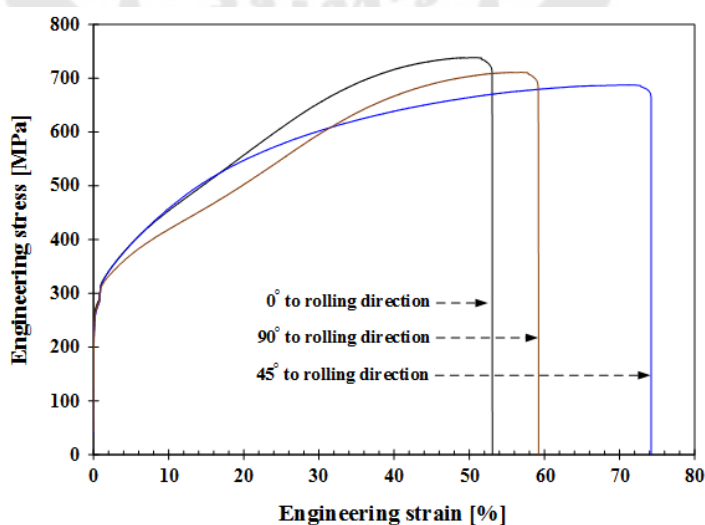
บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

จากการวางแผนการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบ ทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบและทดลองดังกล่าวบนหลักทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังบทที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์

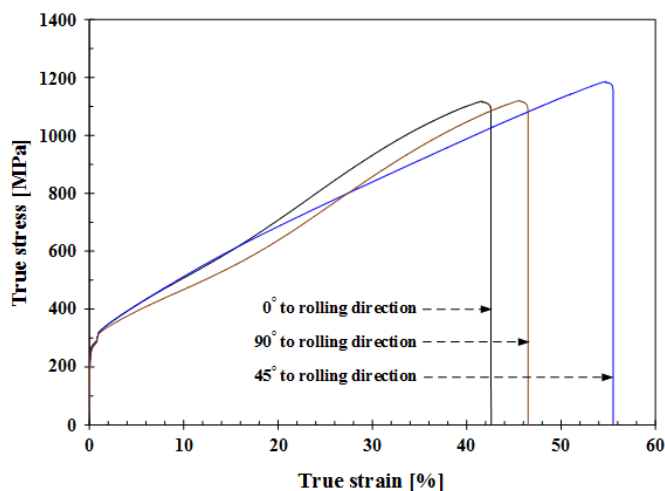
การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานโดยการทดสอบด้วยแรงดึง ผู้วิจัยได้อ้างอิงการทดสอบดังกล่าวตามมาตรฐาน ASTM E8 การทดสอบใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้นแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผลสมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงานที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ความเค้นคราก (σ_y) ความเค้นสูงสุด (σ_u) เปอร์เซนต์การยืดตัวของวัสดุ (% Elongation) เส้นโค้งการไหลตัว (Flow curve) และค่าอัตราส่วนความเครียดถาวร (r) ของวัสดุขึ้นงาน ทั้งนี้เมื่อได้พฤติกรรมของโลหะแผ่นขึ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ซึ่งแสดงด้วยเส้นการไหลตัวของวัสดุดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยจะได้หาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ (Strength coefficient) หรือค่า K และตัวยกกำลังของการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด (Strain hardening exponent) หรือค่า n ของวัสดุดังกล่าวเพื่อนำไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



ภาพประกอบ 33 กราฟความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

ภาพประกอบ 33 แสดงกราฟความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering stress-strain curve) ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ที่ถูกเตรียมให้มีการใช้แรงดึงในแนวแกนเดียวตามทิศทางแนวรีด (Rolling direction) หรือ 0° กับทิศทางแนวรีด 45° กับทิศทางแนวรีด และ 90° กับทิศทางแนวรีดหรือขวางแนวรีด จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าทิศทางแนวรีดมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานและจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการขึ้นรูปของวัสดุด้วยดังจะเห็นได้จากลักษณะของกราฟความเค้นทางวิศวกรรมกับความเครียดทางวิศวกรรมซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี [6,7] โดยชิ้นทดสอบที่ถูกเตรียมตามทิศทางแนวรีดจะมีค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุสูงสุดแต่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดต่ำสุด ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ถูกเตรียม 45° กับทิศทางแนวรีดจะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดแต่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นความเครียดของวัสดุจะลดลง

ทั้งนี้ผลการหาคำนวณหาค่าอัตราส่วนความเครียดถาวร (r) ซึ่งบอกถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางของวัสดุ ค่าดังกล่าวเท่ากับความเครียดจริงของการเปลี่ยนแปลงด้านความกว้าง (ϵ_w) หารด้วยความเครียดจริงของการเปลี่ยนแปลงด้านความหนา (ϵ_t) ดังสมการ (15) ในบทที่ 2 โดยที่ค่าอัตราส่วนความเครียดถาวรในทิศทางตามทิศทางแนวรีด (r_0) 45° กับทิศทางแนวรีด และ 90° กับทิศทางแนวรีด มีค่าเท่ากับ 0.87844, 1.15287 และ 0.83021 ตามลำดับ เมื่อนำค่า r ที่ได้จากแต่ละทิศทางตามแนวรีดมาคำนวณหาค่า Δr ตามสมการ (17) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้พิจารณาพฤติกรรมการลากขึ้นรูปของวัสดุในส่วนของขอบถ้วยที่ขึ้นรูปจากการคำนวณค่า Δr ของวัสดุ SUS304 BA มีค่าเท่ากับ -0.59709 โดยทั่วไปโลหะแผ่นจะมีส่วนของขอบถ้วยไม่เสมอกัน หรือเรียกว่า Earing ยกเว้นกรณีที่วัสดุที่ถูกลากขึ้นรูปนั้นมีค่า $\Delta r = 0$ นั้นหมายความว่าวัสดุชิ้นงานถ้วยจะไม่เกิด Earing แต่ถ้า $\Delta r > 0$ จะเกิด Earing ที่ 0° และ 90° กับทิศทางแนวรีด และถ้า $\Delta r < 0$ จะเกิด Earing ที่ 45° กับทิศทางแนวรีด [58]



ภาพประกอบ 34 กราฟเส้นโค้งการไหลตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟเส้นโค้งการไหลตัวของวัสดุขึ้นทดสอบได้ด้วยการคำนวณตามสมการ (2.13) และ (2.14) โดยกราฟความเค้นจริงกับความเครียดจริงหรือกราฟเส้นโค้งการไหลตัวของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA แสดงดังภาพประกอบ 34

เมื่อนำค่าความเค้นจริงกับความเครียดจริงที่เขียนเส้นโค้งการไหลตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ไปพล็อตบนกระดาษ log-log จะสามารถหาค่า K และค่า n ได้เท่ากับ 1323 MPa และ 0.4255 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้นำไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

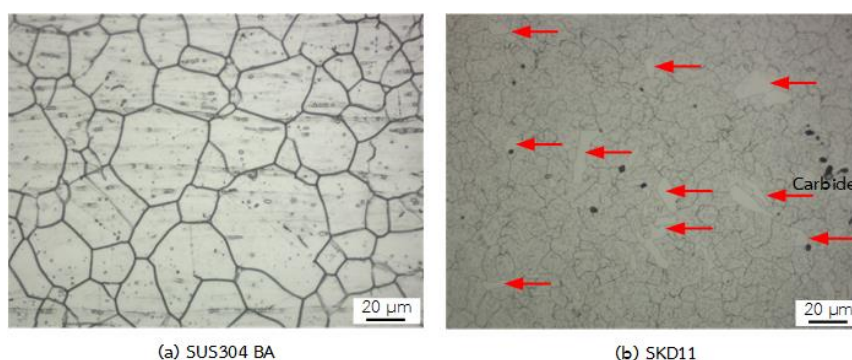
จากการทดสอบด้วยแรงดึงแบบแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8 สามารถหาสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ได้ดังภาคผนวก ข และสรุปไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 สมบัติทางกลของวัสดุขึ้นงาน SUS304 BA

Orientation	E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	Elongation [%]	K [MPa]	n	r
0°	211.476	270.140	730.523	56.7	1439.80	0.4465	0.8784
45°	210.026	264.263	686.440	71.7	1317.45	0.4134	1.1529
90°	213.372	268.023	716.773	58.3	1210.42	0.4167	0.8302
Average	212	267	711	62	1323	0.4255	0.9538

4.2 โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางเคมีของวัสดุชิ้นงานและวัสดุทำแม่พิมพ์

วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ในสภาวะจำหน่าย (As received) และ วัสดุทำแม่พิมพ์ เกรด SKD11 ในสภาวะชุบแข็งและทำการอบคืนไฟ ถูกตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุดังกล่าว ผลการตรวจสอบแสดงด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคกำลังขยาย 500 เท่า ดังภาพประกอบ 35 และส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสองแสดงดังตาราง 9 (ผลการตรวจสอบแสดงในภาคผนวก ค)



ภาพประกอบ 35 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) วัสดุชิ้นงาน และ (b) วัสดุทำแม่พิมพ์

ตาราง 9 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงานและวัสดุทำแม่พิมพ์

SUS304 BA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	0.0342	0.5467	1.0501	0.0361	0.0082	18.4744	0.1023	8.2941
	Al	Cu	Nb	Ti	V	B	Fe	
	0.0033	0.1417	<0.0002	0.0017	0.0830	<0.0001	Bal.	
SKD11	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	1.4346	0.2285	0.2869	0.0337	0.0028	11.6004	0.8489	0.4832
	Al	Cu	Nb	Ti	V	B	Fe	
	0.0067	0.1656	-	-	0.2421	-	Bal.	

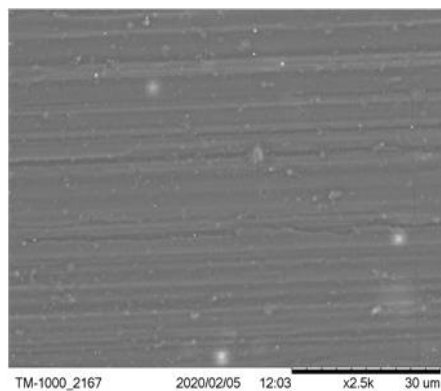
ภาพประกอบ 35 (a) แสดงโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นฐานคล้ายโครงตาข่ายผลึกที่เรียกว่า โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด SUS304 ซึ่งเป็นผลจากการเติมธาตุนิเกิล (Nickel) โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการ

ยึดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ทำให้สามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว [19] ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มีปริมาณธาตุ निकิลเกิดประกอบอยู่ร้อยละ 8.2941 และมีปริมาณธาตุโครเมียมประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 18

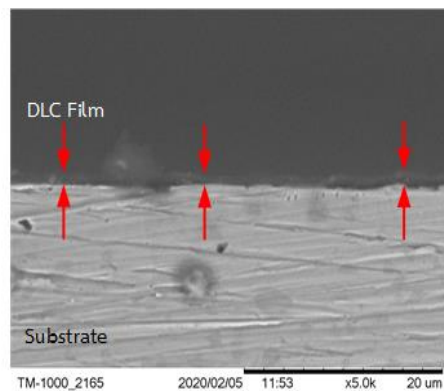
วัสดุทำแม่พิมพ์สำหรับการศึกษาค้างนี้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือเพื่อใช้สำหรับงานขึ้นรูปเย็น ทั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เหล็กชนิดดังกล่าวเป็นวัสดุทำแม่พิมพ์และชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนตามเงื่อนไขที่ใช้ในการขึ้นรูปจริงของโรงงานกรณีศึกษา โครงสร้างทางจุลภาคภายในเนื้อของเหล็กดังกล่าวในสภาวะจำหน่าย จะมีโครงสร้างผลึกที่เรียกว่า คาร์ไบด์ (Carbide) รูปร่างต่าง ๆ กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) แต่เมื่อนำเหล็กกล้าเครื่องมือดังกล่าวไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้แข็งขึ้น (Hardening) โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเนื้อเหล็ก และเมื่อทำการอบคืนไฟ (Tempering) เหล็กดังกล่าวเพื่อให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น คือ ไม่แข็งเปราะ จะพบว่าเม็ดคาร์ไบด์จะมีความมันขึ้นและเกิดการรวมตัวกันกระจายทั่วทั้งเนื้อโลหะ ดังภาพประกอบ 35 (b)

4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง

ฟิล์มแข็งที่ผู้วิจัยเลือกศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ฟิล์มแข็งชนิด DLC (Diamond-like Carbon), CrN (Chromium Nitride), TiN (Titanium Nitride), TiCN (Titanium Carbon Nitride) และ TiAlN (Titanium Aluminum Nitride) ซึ่งพิจารณาเลือกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผู้วิจัยได้พบทวนวรรณกรรม ฟิล์มที่ผู้วิจัยเลือกเป็นฟิล์มที่มีใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะและมีผู้ให้บริการรับเคลือบผิวภายในประเทศ โดยที่ฟิล์มจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มที่มีโครงสร้างคล้ายเพชรอย่างฟิล์มแข็งชนิด DLC และฟิล์มแข็งกลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นฐาน (Nitrogen based) อย่างฟิล์มแข็งชนิด CrN, TiN, TiCN และ TiAlN ภาพถ่ายฟิล์มแข็งที่ศึกษาที่เคลือบบนผิววัสดุพื้น (Substrate) SKD11 แสดงดังภาพประกอบ 36 ถึงภาพประกอบ 40 ตามลำดับ สมบัติทางกลและทางกายภาพของฟิล์มแข็งที่ผู้วิจัยศึกษาแสดงดังตาราง 10

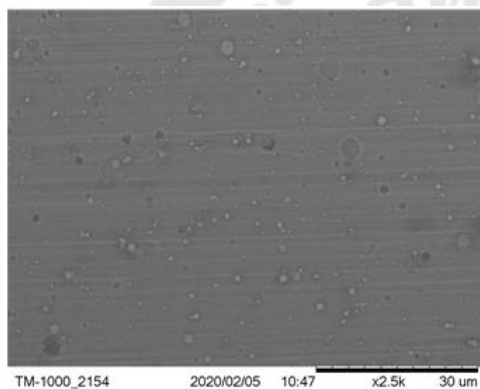


(a) ผิวฟิล์ม DLC

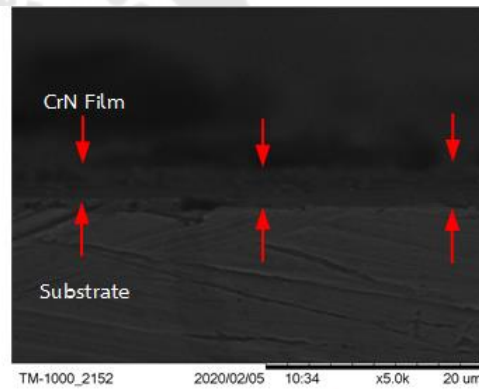


(b) ภาพตัดขวางฟิล์ม DLC บนเหล็กกล้า SKD11

ภาพประกอบ 36 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด DLC

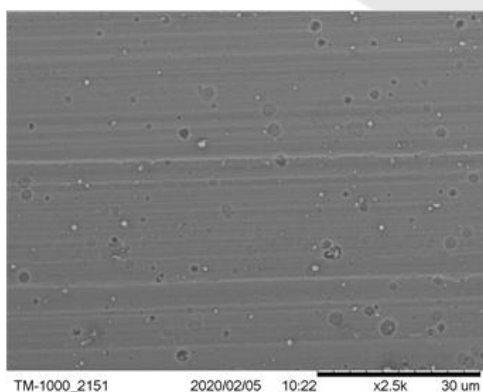


(a) ผิวฟิล์ม CrN

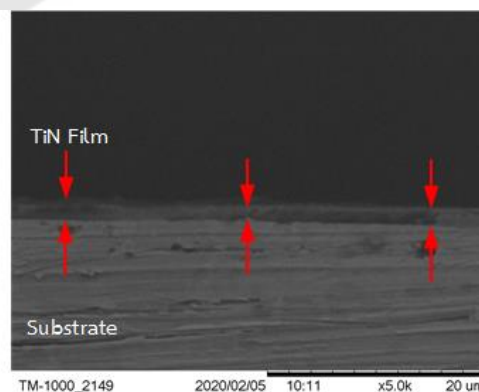


(b) ภาพตัดขวางฟิล์ม CrN บนเหล็กกล้า SKD11

ภาพประกอบ 37 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด CrN

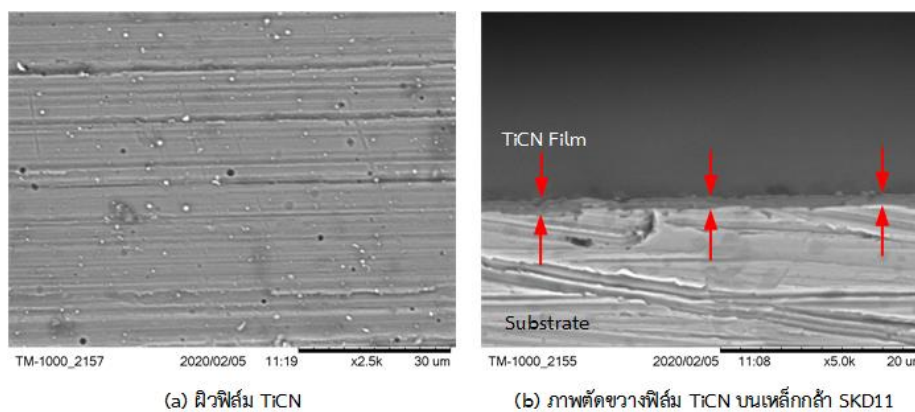


(a) ผิวฟิล์ม TiN

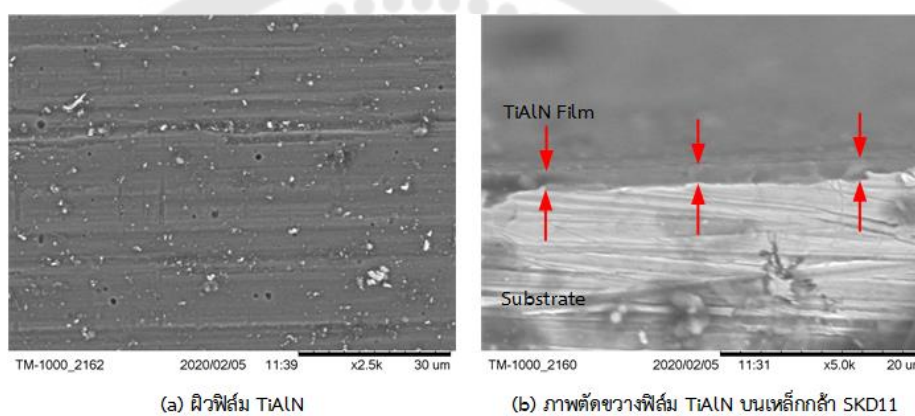


(b) ภาพตัดขวางฟิล์ม TiN บนเหล็กกล้า SKD11

ภาพประกอบ 38 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiN



ภาพประกอบ 39 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiCN



ภาพประกอบ 40 รูปถ่าย SEM ของฟิล์มแข็งชนิด TiAlN

ตาราง 10 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มแข็ง

Film type	Color	Film thickness [μ m]	Surface roughness: R_a [μ m]	Hardness [HV]
DLC	Black	1.20	0.079	2993 (2000 – 3500)*
CrN	Silver	2.95	0.101	1646 (1200 – 2200)*
TiN	Gold	1.79	0.091	2157 (1800 – 2200)*
TiCN	Gray	1.24	0.142	2765 (2000 – 3000)*
TiAlN	Purple	2.69	0.106	2762 (2000 – 3000)*
Non-coated (SKD11 hardened)			0.114	714

หมายเหตุ * ข้อมูลจากผู้เคลือบฟิล์ม

โดยทั่วไปการรายงานค่าความแข็งของฟิล์มแข็งในรายงานวิจัยนิยมรายงานในหน่วย SI คือ MPa หรือ GPa ทั้งนี้สามารถแปลงค่าความแข็งในหน่วย HV เป็น GPa โดยการนำค่าความแข็งในหน่วย HV คูณด้วยค่าคงที่ 0.009807 [14]

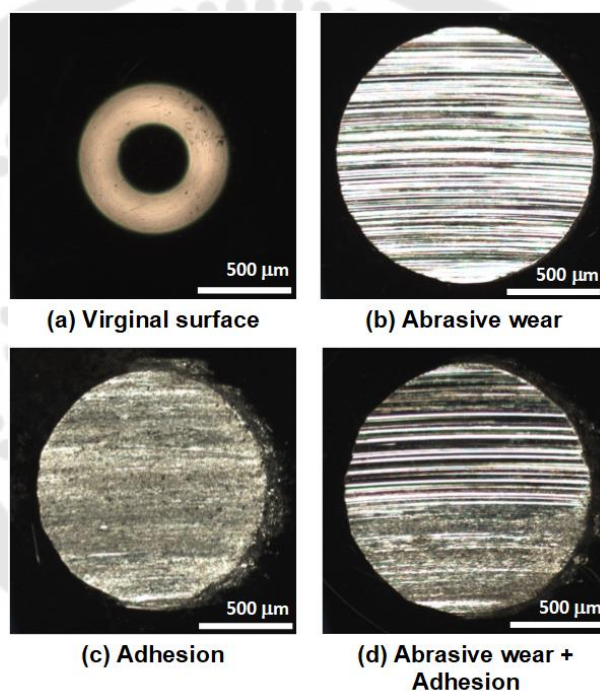
ภาพประกอบ 36 ถึงภาพประกอบ 40 แสดงลักษณะผิวและชั้นฟิล์มของฟิล์มแข็งที่ศึกษาในงานนี้ จากการวัดความหนาของชั้นฟิล์มด้วยซอฟต์แวร์ของเครื่อง SEM Tabletop Microscope รุ่น TM-1000 ฟิล์มแข็งที่ศึกษาที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเฉลี่ยอยู่ระหว่างค่า 1 ถึง 3 μm โดยฟิล์มแข็งชนิด DLC มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุดเท่ากับ 1.20 μm และฟิล์มแข็งชนิด CrN มีความหนาของชั้นฟิล์มมากที่สุด คือ 2.95 μm สำหรับค่าความหนาฟิล์มของฟิล์มแข็งชนิดอื่นที่ศึกษาแสดงในตาราง 10

จากผลการตรวจสอบค่าความหยาบผิว (Surface roughness) ของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุทำแม่พิมพ์ เกรด SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 60.7 HRC และตกแต่งผิวด้วยการเจีย (Grinding) จะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 0.114 μm และเมื่อนำชิ้นทดสอบดังกล่าวไปทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ แล้วนำกลับมาวัดค่าความหยาบผิวซ้ำ พบว่า ฟิล์มแข็งแต่ละชนิดที่เคลือบบนชิ้นทดสอบมีค่าความหยาบผิวแตกต่างกันดังตาราง 10 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมีส่วนมากจะค่าความหยาบผิวเฉลี่ยลดลงจากค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเริ่มต้น (0.114 μm) ยกเว้นวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มชนิด TiCN จะมีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น

ผลการวัดค่าความแข็งในระดับนาโนของฟิล์มแข็งชนิดต่าง ๆ ที่ทดสอบด้วยการกดในระดับนาโนเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่ได้จากข้อมูลของผู้เคลือบฟิล์มดังข้อมูลในตาราง 10 และภาคผนวก ง พบว่าค่าความแข็งที่วัดในระดับนาโนของฟิล์มแต่ละชนิดมีความแปรปรวนของข้อมูลสูงแต่ยังอยู่ในช่วงข้อมูลค่าความแข็งที่ได้จากบริษัทผู้เคลือบฟิล์ม โดยทั่วไปค่าความแข็งของฟิล์มที่ได้จากข้อมูลของผู้เคลือบฟิล์มนั้นเป็นการวัดค่าความแข็งของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนบาง (Silicon wafer) ที่มีค่าความหยาบผิวต่ำมาก ทำให้ไม่มีอิทธิพลเรื่องความหยาบผิวของวัสดุพื้น (Substrate) หรือวัสดุชิ้นงานที่ถูกเคลือบฟิล์มเข้ามาเกี่ยวข้อง ในขณะที่ผู้ศึกษาทำการวัดค่าความแข็งของฟิล์มแข็งที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ ชุบแข็งแล้วผ่านการตกแต่งผิวด้วยการเจียละเอียด ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ ดังนั้นค่าความหยาบผิวที่สูงของวัสดุเครื่องมือที่ผ่านกระบวนการเจียละเอียด (พิจารณาภาพประกอบ 36 (a) ถึง 40 (a)) เมื่อเทียบกับค่าความหยาบผิวของแผ่นซิลิกอนบาง จึงอาจส่งผลต่อการวัดค่าความแข็งในระดับนาโนดังงานวิจัยที่ผ่านมา [59] ได้อธิบายไว้

4.4 พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์

พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ถูกทดสอบด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ อ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G 99-95a และ ASTM G 133-05 ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานทางกายภาพระหว่างผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกันโดยมีความดันกระทำที่จุดสัมผัส โดยผู้วิจัยสร้างบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 และปรับปรุงให้มีสมบัติเช่นเดียวกับวัสดุทำแม่พิมพ์ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2 สำหรับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA ถูกเตรียมให้เป็นแผ่นจานเพื่อใช้ในการทดสอบในลักษณะบอลหมุนบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) โดยทำการทดสอบในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น



ภาพประกอบ 41 ลักษณะของผิวบอลบริเวณพื้นที่สัมผัสกับผิวของวัสดุชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ

4.4.1 รูปแบบความเสียหายของวัสดุทำแม่พิมพ์

การตรวจสอบลักษณะของบอลที่เคลื่อนที่สัมผัสกับแผ่นจานภายใต้ความดันสัมผัสและความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างๆ บนสภาพไม่ใช้สารหล่อลื่น (Dry condition) ตามขอบเขตที่ผู้วิจัยกำหนด โดยใช้ Vision Unit ตรวจสอบและถ่ายภาพ

ภาพประกอบ 41 (a) แสดงลักษณะของผิวบอลล่อนการทดสอบ (Virginal surface) ด้วยไทรบอมิเตอร์ เนื่องจากผิวของบอลมีทรงกลมและมีความเงาจึงเกิดการสะท้อนจากแสงของไฟของเครื่อง Vision unit ซึ่งส่วนบริเวณตรงกลางบอลที่ยังไม่เกิดการสึกหรอจะมีความสูงกว่าส่วนอื่นจึงทำให้จับภาพได้เป็นสีดำ ในขณะที่รอยสึกหรอของบอลที่ผ่านการทดสอบตามเงื่อนไขต่างๆ พบว่ามี 3 ลักษณะ คือ เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) ดังภาพประกอบ 41 (b) เกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน (Adhesion) บนผิวของบอลดังภาพประกอบ 41 (c) และเกิดการสึกหรอแบบขัดถูร่วมกับการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน (Abrasive wear+Adhesion) ดังภาพประกอบ 41 (d)

พฤติกรรมการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการยึดติดบนผิวบอลล่อนซึ่งถือได้ว่าเป็นพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ซึ่งผู้วิจัยจะนำบอลมาขยายบริเวณพื้นที่สัมผัสด้วยชุด Vision unit ทุกๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m จนถึงการทดสอบที่ระยะทาง 1,200 m ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตาราง 11

ตาราง 11 ผลการศึกษารูปแบบความเสียหายของวัสดุทำแม่พิมพ์

Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Sliding distance [10^2 m]											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
807	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	100	○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	●
	150	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1095	50	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	100	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	150	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1280	50	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	100	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1280	150	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

○ Abrasive wear, ● Adhesion, ● Abrasive wear + Adhesion

จากการทดสอบ Ball-on-Disk เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ ผลการศึกษาสรุปได้ดังตาราง 11 ซึ่งพบว่ามีเพียงเงื่อนไขการทดลองที่ความดันสัมผัส (Contact pressure) เท่ากับ 807 MPa ด้วยความเร็วการเคลื่อนที่ (Sliding velocity) เท่ากับ 50 mm/s ที่ไม่พบการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ยึดติดบนผิวของวัสดุทำแม่พิมพ์ เกรด SKD11 ทั้งนี้รูปแบบการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานที่ความดันสัมผัสเท่ากับ 807 MPa ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 100 และ 150 mm/s จะเป็นไปในรูปแบบการสึกหรอแบบขัดถูร่วมกับการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าววิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานในการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น คือ ความดันสัมผัส ความเร็วการเคลื่อนที่ และระยะทางการเคลื่อนที่ (Sliding distance) โดยมีตัวแปรตาม คือ การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนวัสดุทำแม่พิมพ์ ไว้ดังนี้

H_0 : ตัวแปรต้นกับตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปรต้นกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน

Correlation: Contact pressure [MPa], Sliding speed ... ce [m], Adhesion

Correlations

	Contact pressure	Sliding speed [m]	Sliding distance
Sliding speed [m]	0.000 1.000		
Sliding distance	0.000 1.000	0.000 1.000	
Adhesion	0.646 0.000	0.311 0.001	0.233 0.015

Cell Contents
Pearson correlation
P-Value

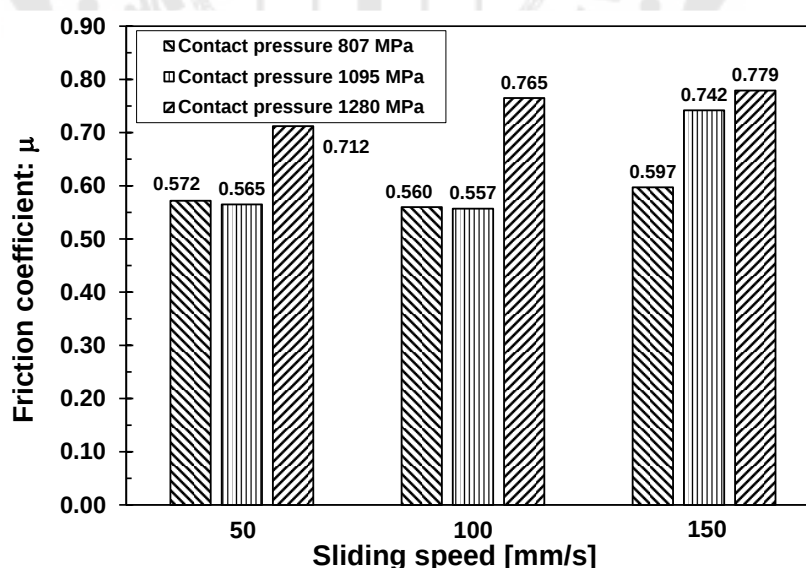
ภาพประกอบ 42 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม จากการทดสอบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์

ผลการทดสอบข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติโดยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) แสดงดังภาพประกอบ 42 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรแรงดันสัมผัสกับพฤติกรรมการยึดติดของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์เท่ากับ 0.646 ซึ่งแปลผลระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองในระดับปานกลาง โดยเมื่อค่าความดันสัมผัสเพิ่มขึ้นจะมีโอกาสเกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์เกรด SKD11 ทั้งนี้ค่า P-

Value ของการทดสอบดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ที่กำหนดไว้ ($\alpha=0.05$) จึงทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง คือ ความดันสัมผัสมีความสัมพันธ์กับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์

สำหรับความเร็วในการเคลื่อนที่กับการยึดติดของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ เท่ากับ 0.311 ซึ่งแปลผลระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองในระดับต่ำกลาง โดยเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะมีโอกาสเกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์เกรด SKD11 ทั้งนี้ค่า P-Value ของการทดสอบดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ที่กำหนดไว้ ($\alpha=0.05$) จึงทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์

ในกรณีของระยะทางการเคลื่อนที่กับการยึดติดของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ เท่ากับ 0.233 ซึ่งแปลผลระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองในระดับต่ำมาก โดยเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะมีโอกาสเกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์เกรด SKD11 ทั้งนี้ค่า P-Value ของการทดสอบดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ที่กำหนดไว้ ($\alpha=0.05$) จึงทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์



ภาพประกอบ 43 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุ SUS304 BA กับวัสดุ SKD11 บนสภาพไม่มีการหล่อลื่นตามเงื่อนไขต่างๆ

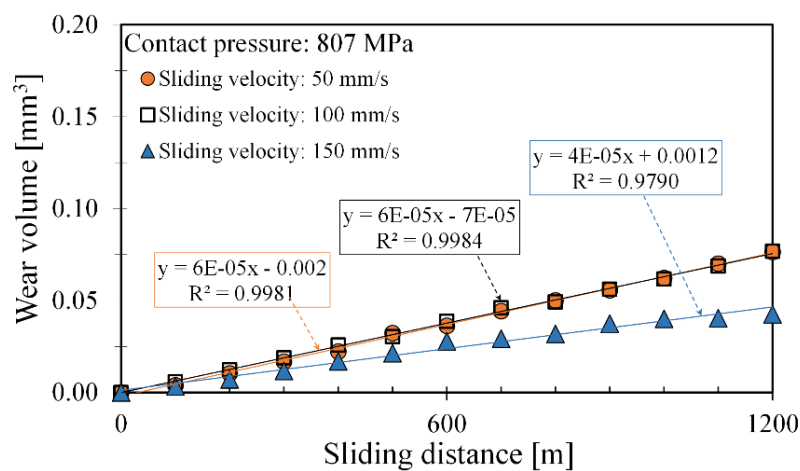
4.4.2 ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุขึ้นงาน

ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA บนสภาพไม่ใช้สารหล่อลื่นตามขอบเขตที่ผู้วิจัยกำหนดนั้น ผู้วิจัยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (Friction coefficient; μ) ที่อ่านค่าได้จากซอฟต์แวร์ InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10 ซึ่งต่อพ่วงกับชุดทดสอบไทรบอมิเตอร์ (ดังภาพประกอบ 20) โดยค่าที่นำมารายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ทดสอบภายใต้ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ 43

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ได้จากการทดสอบสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มช่วงค่า 0.5 กับกลุ่มช่วงค่า 0.7 เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษารูปแบบความเสียหายของวัสดุทำแม่พิมพ์ตามตาราง 11 พบว่ากลุ่มความเสียหายที่มีช่วงค่า 0.7 จะเป็นกลุ่มที่เกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงาน SUS304 BA บนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ทั้งนี้จากเศษวัสดุขึ้นงานที่ยึดติดบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ทำให้เศษวัสดุดังกล่าวครูดเนื้อของวัสดุขึ้นงานส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงขึ้นด้วยซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 45, 50, 57, 60-64]

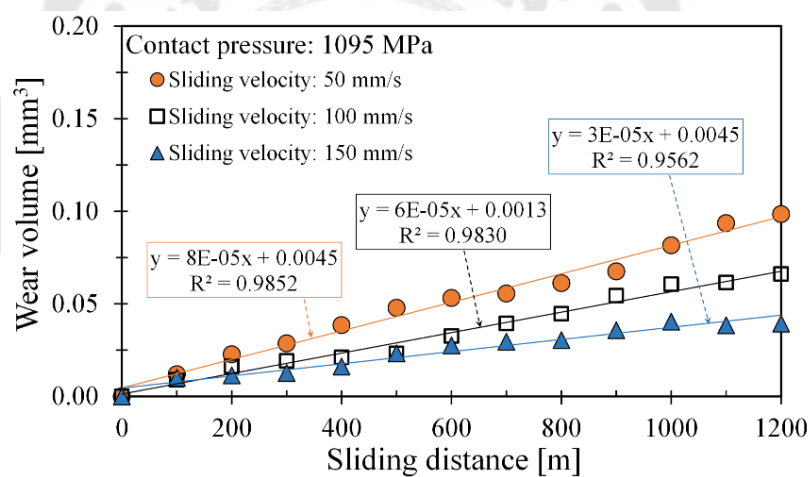
4.4.3 การสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์

การวัดปริมาตรการสึกหรอ (Wear volume) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้การทดลองแบบ Ball-on-Disk ด้วยไทรบอมิเตอร์ ที่ทุกๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m บอลจะถูกนำมาขยายรอยสึกหรอด้วยชุด Vision Unit เพื่อถ่ายภาพและวัดรอยสึกหรอ โดยปริมาตรการสึกหรอในรูปของปริมาตรสามารถคำนวณได้จากสมการ (18) ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ที่วัดและคำนวณได้ที่ทุกๆ ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m จนถึงระยะทาง 1200 m จะถูกพล็อตเปรียบเทียบ กับระยะทางการเคลื่อนที่บนระดับความดันสัมผัส 807 MPa, 1095 MPa และ 1280 MPa ดังภาพประกอบ 44 ถึงภาพประกอบ 46 ตามลำดับ จากภาพดังกล่าวลักษณะการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็งจะมีแนวโน้มเป็นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งมีค่าทางสถิติ R^2 ของตัวแบบสมการเชิงเส้นที่แตกต่างกัน



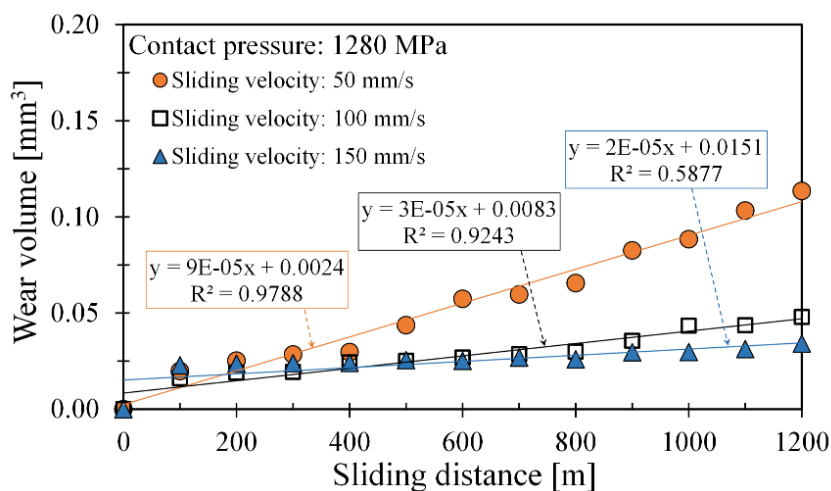
ภาพประกอบ 44 กราฟปริมาณการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 807

MPa



ภาพประกอบ 45 กราฟปริมาณการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 1095

MPa



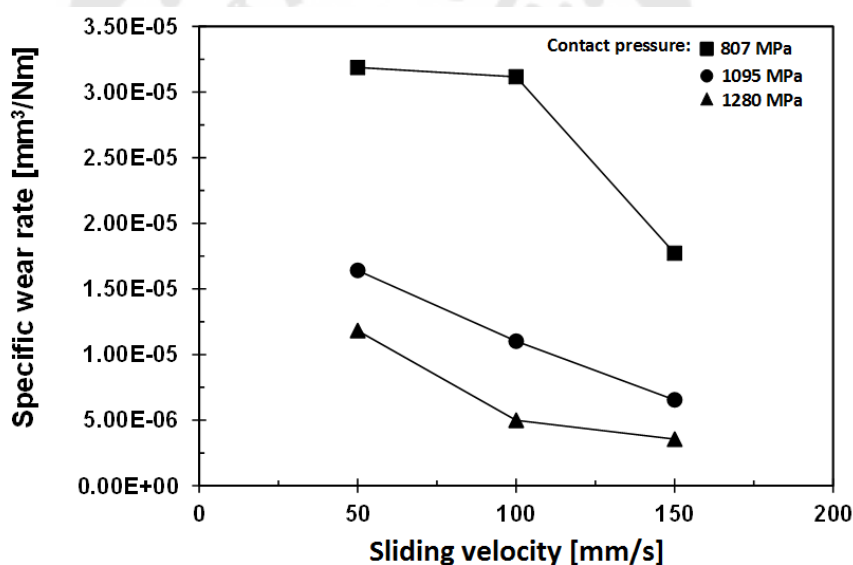
ภาพประกอบ 46 กราฟปริมาตรการสึกหรอเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัส 1280 MPa

จากภาพประกอบ 44 ถึงภาพประกอบ 46 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของระยะทางการเคลื่อนที่กับปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกที่ทุกๆ การทดสอบบนแรงดันสัมผัสที่แตกต่างกัน ทำให้แปลความหมายได้ว่าเมื่อระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะเกิดปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14]

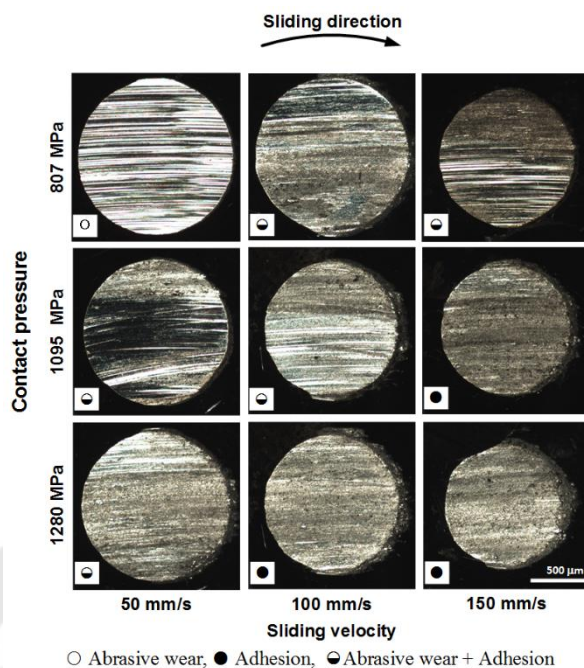
อย่างไรก็ดีตัวแบบสมการเส้นตรงของปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 เทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ ที่ความเร็วการทดสอบเท่ากับ 150 mm/s บนความดันสัมผัสเท่ากับ 1280 MPa ที่มีค่า R^2 น้อยกว่า 0.75 ซึ่งแปลผลได้ว่าตัวแปรต้นกับตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้นต่ำ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตามภาพประกอบ 46 ในช่วง 100 m แรกของการทดสอบ บอล SKD11 จะมีปริมาตรการสึกหรอสูง แต่หลังจากระยะทางดังกล่าวจนถึงระยะทาง 1200 m บอลดังกล่าวจะเกิดการสึกหรอน้อย ดังพิจารณาได้จากลักษณะความชันของเส้นกราฟปริมาตรการสึกหรอซึ่งมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นที่ระยะทางการทดสอบ 1200 m ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 เทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ ที่ความเร็วการทดสอบเท่ากับ 150 mm/s บนความดันสัมผัสเท่ากับ 1280 MPa จึงมีค่า R^2 น้อยกว่า 0.75

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) บนแรงดันสัมผัสที่ใช้ในการทดสอบที่แตกต่างกันโดยคำนวณจากสมการ (19) ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 1200 m ดังภาพประกอบ 47 พบว่า ที่แรงดันสัมผัสและความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของบอล SKD11 มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปแบบความ

เสียหายของบอล SKD11 ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 1200 m ดังภาพประกอบ 48 พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะ โดยเงื่อนไขการทดสอบที่มีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะต่ำ ขนาดความเสียหายหรือรอยสึกหรอของบอล SKD11 จะมีขนาดเล็ก เนื่องจากรูปแบบความเสียหายที่พบเป็นแบบการยึดติดของเศษวัสดุชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างจากบอล SKD11 ที่มีรูปแบบความเสียหายในลักษณะการสึกหรอแบบขูดถู ดังเงื่อนไขการทดสอบด้วยความเร็วการเคลื่อนที่ 50 mm/s บนแรงดันสัมผัสเท่ากับ 807 MPa ทั้งนี้เนื่องจากเศษวัสดุชิ้นงานที่พอกติดบนผิวบอล SKD11 จะช่วยลดการสึกหรอแบบขูดถูของวัสดุ SKD11 จึงทำให้ขนาดของรอยสึกหรอบนผิวบอล SKD11 เล็กกว่า ส่งผลให้ค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะต่ำกว่าด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับผิวบอล SKD11 ที่มีการสึกหรอแบบขูดถู ดังนั้นความรุนแรงของการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวบอล SKD11 ยิ่งมาก รอยการสึกหรอของผิวบอลจะยังมีขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 47 อัตราการสึกหรอจำเพาะของบอล SKD11 ที่ระยะทางการเคลื่อนที่บนแรงดันสัมผัสต่างๆ



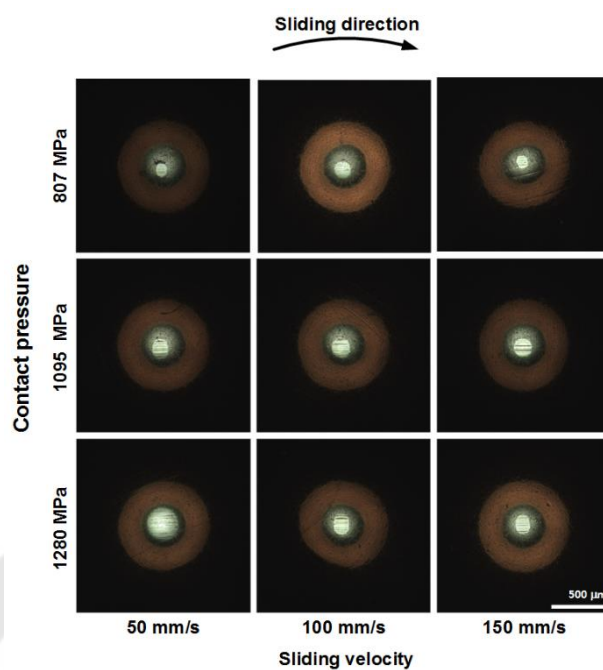
ภาพประกอบ 48 ลักษณะความเสียหายของบอล SKD11 ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 1200 m

4.5 พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับฟิล์มแข็ง

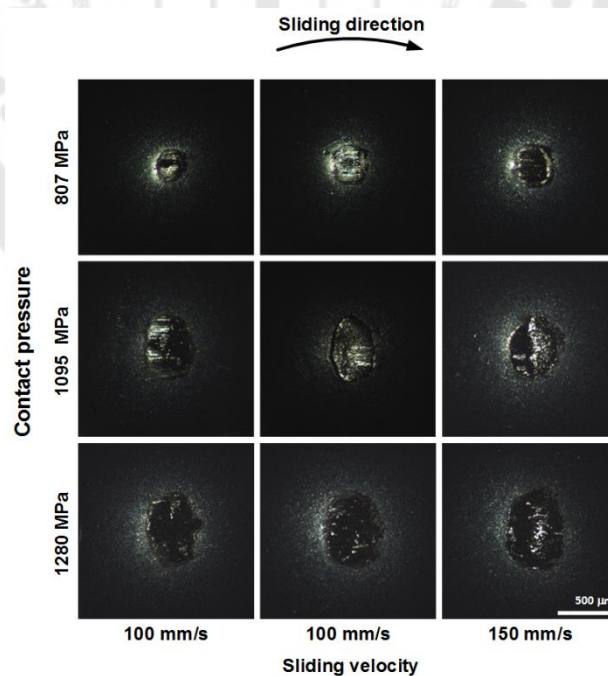
หลังจากที่ทราบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้มีความแข็งเป็นไปตามช่วงที่กำหนด ดังหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งนอกจากปัญหาการสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์แล้ว ปัญหาหลักของการขึ้นรูปโลหะแผ่นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA คือ การเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนวัสดุทำแม่พิมพ์ ดังนั้นจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีรายงานว่าช่วยป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานโลหะแผ่นขณะทำการขึ้นรูปได้ ผู้วิจัยจึงเลือกชนิดของฟิล์มแข็งและใช้ไทรบอมิเตอร์ในการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุขึ้นงานกับฟิล์มแข็งในสภาวะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น ซึ่งผลการศึกษามีละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1 รูปแบบความเสียหายของฟิล์มแข็งที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ชุบแข็ง

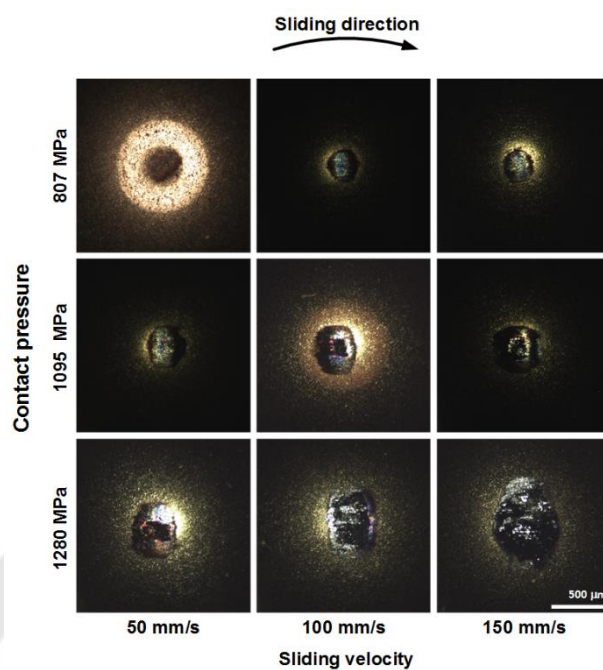
จากการทดสอบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสฟิล์มแข็งที่เคลือบบนบอล SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA นั้น ฟิล์มแข็งแต่ละชนิดจะมีความเสียหายเกิดขึ้นตั้งแต่ระยะทาง 100 เมตรแรก ดังภาพประกอบ 49 ถึงภาพประกอบ 53



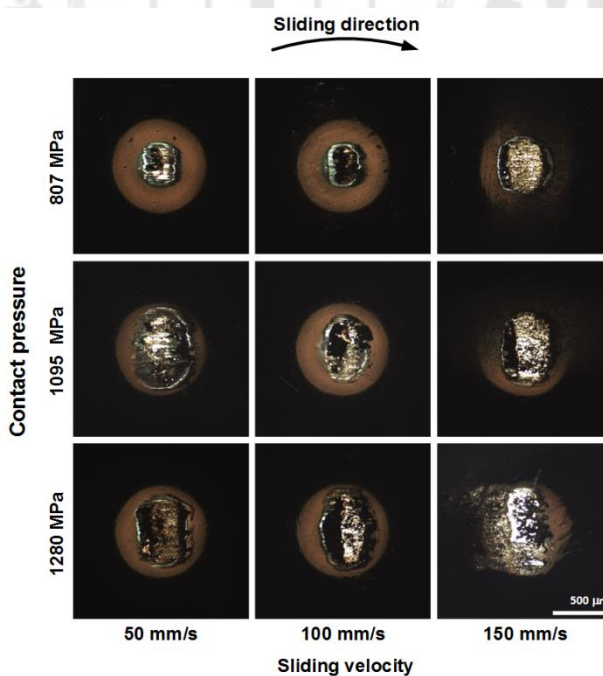
ภาพประกอบ 49 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด DLC ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m



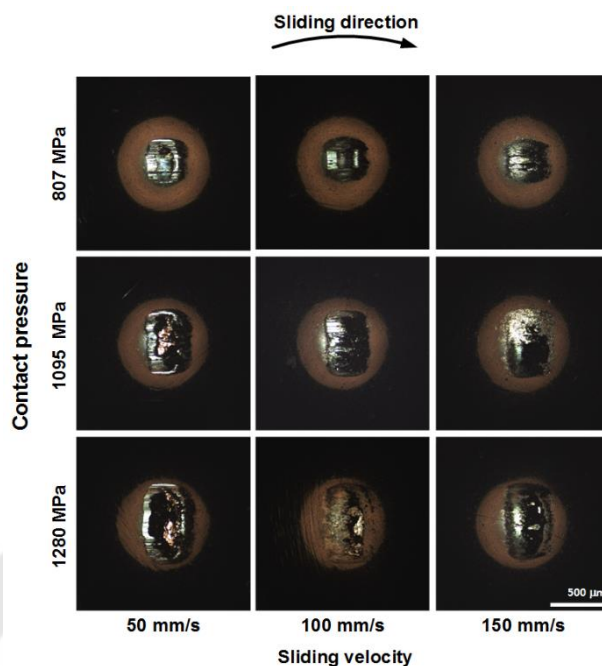
ภาพประกอบ 50 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด CrN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m



ภาพประกอบ 51 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m



ภาพประกอบ 52 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiCN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m



ภาพประกอบ 53 ลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งชนิด TiAlN ที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m

ผลการตรวจสอบบริเวณพื้นที่สัมผัสของบอลที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ ด้วยชุด Vision unit ทุกๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m จนถึงการทดสอบที่ระยะทาง 1200 m แสดงดังตาราง 12

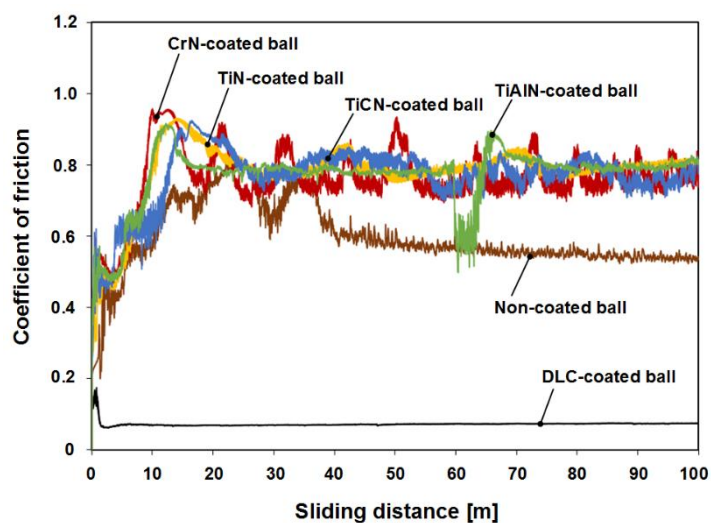
จากตารางดังกล่าวเมื่อพิจารณาลักษณะความเสียหายของฟิล์มแข็งแต่ละชนิดที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 ผ่านการชุบแข็งนั้น ทุกๆ ชนิดฟิล์มแข็งจะเกิดความเสียหายที่แตกต่างกันตั้งแต่ระยะทางการเคลื่อนที่ 100 m ขึ้นอยู่กับแรงดันสัมผัสและความเร็วการเคลื่อนที่ในการทดสอบ แต่มีเพียงฟิล์มแข็ง DLC ชนิดเดียวที่ไม่เกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA (พิจารณาภาพประกอบ 50) แต่จะมีการสึกหรอแบบขูดถูที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ แรงดันสัมผัส และความเร็วในการเคลื่อนที่ และเมื่อพิจารณาความสามารถในการป้องกันการยึดติดของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ฟิล์มแข็ง DLC จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันการยึดติดของวัสดุชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแข็งชนิดอื่น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการศึกษาดังตาราง 12 โดยการตรวจสอบด้วย Vision unit ไม่พบการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนฟิล์มดังกล่าวที่การทดสอบด้วยแรงดันสัมผัส 807 MPa และความเร็วการเคลื่อนที่ 50mm/s กับ 100 mm/s ดังนั้นฟิล์มแข็งชนิด DLC จึงเป็นทางเลือกในการ

Film type	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Sliding distance [10^2 m]											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1280	50	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
		100	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
		150	○	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●
TiAlN	807	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		100	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		150	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1095	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		100	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		150	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1280	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●
		100	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		150	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

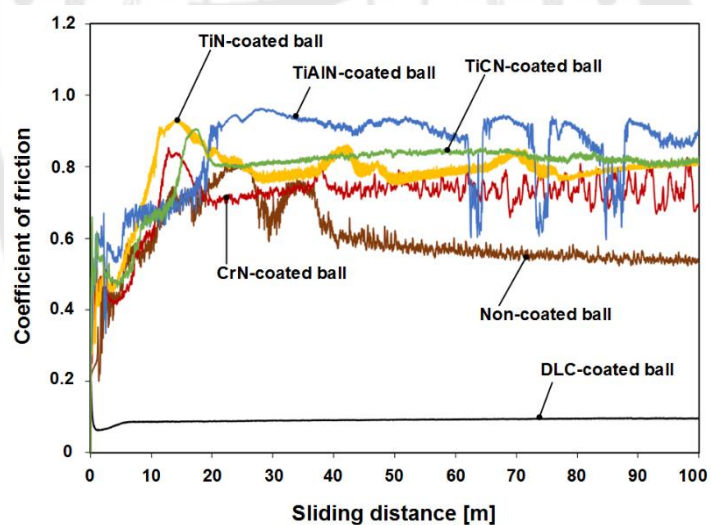
○ Abrasive wear, ● Adhesion, ○ Abrasive wear + Adhesion

4.5.2 ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน

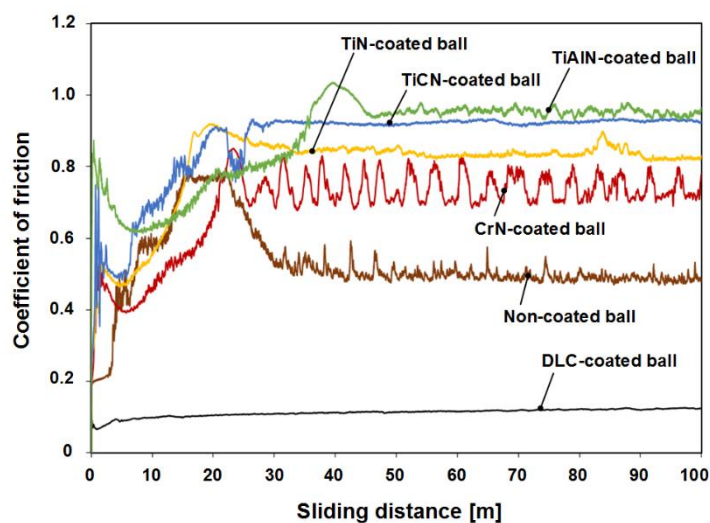
พฤติกรรมของผิวคู่สัมผัสฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ กับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA บนสภาพไม่ใช้หล่อลื่นตามขอบเขตที่ผู้วิจัยกำหนดนั้น ได้จากการทดสอบด้วยไทรบอมิเตอร์ที่รายงานผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (Coefficient of friction) เทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่จนถึงระยะ 100 m แยกแสดงตามความดันสัมผัสกับความเร็วการเคลื่อนที่แสดงดังภาพประกอบ 54 ถึงภาพประกอบ 62 ซึ่งผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบกรณีบอล SKD11 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมาเปรียบเทียบกับ



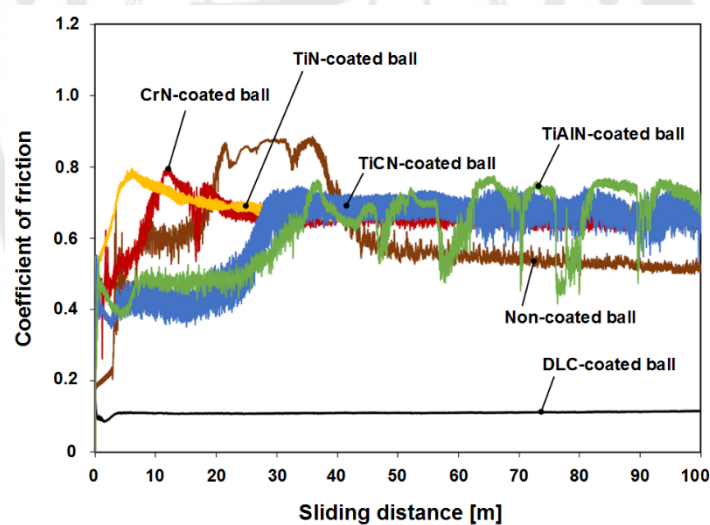
ภาพประกอบ 54 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 807 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 50 mm/s



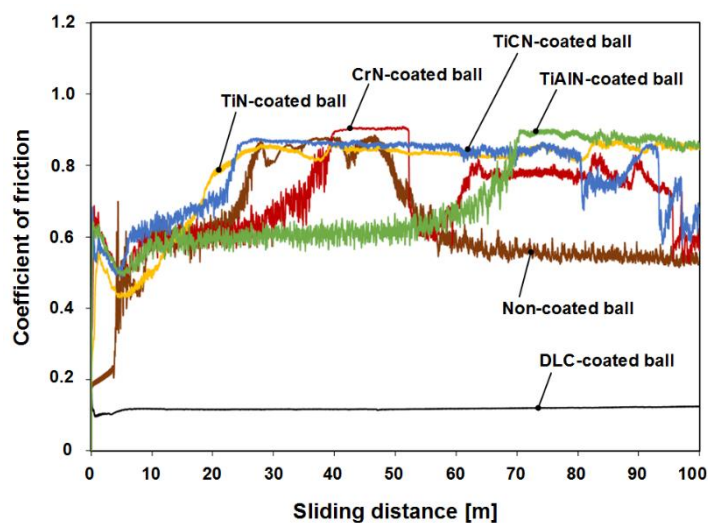
ภาพประกอบ 55 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 807 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 100 mm/s



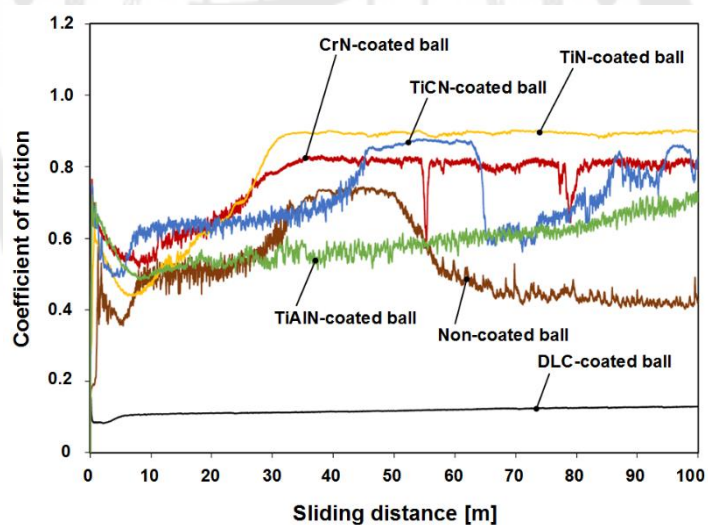
ภาพประกอบ 56 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและ
ไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 807 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 150
mm/s



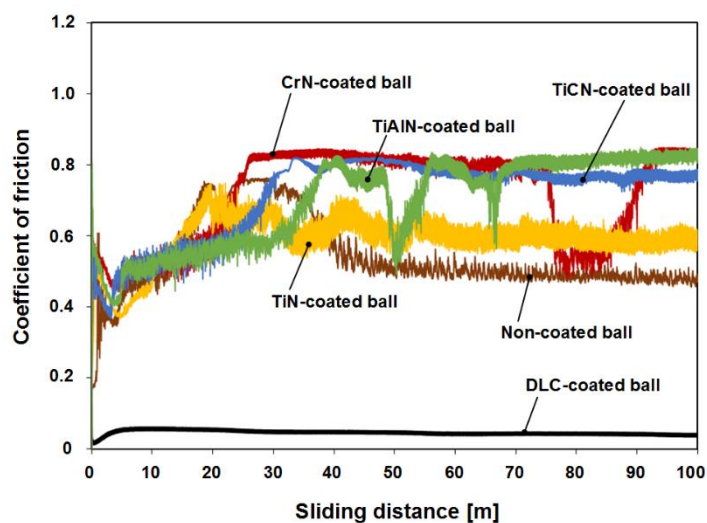
ภาพประกอบ 57 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและ
ไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1095 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 50
mm/s



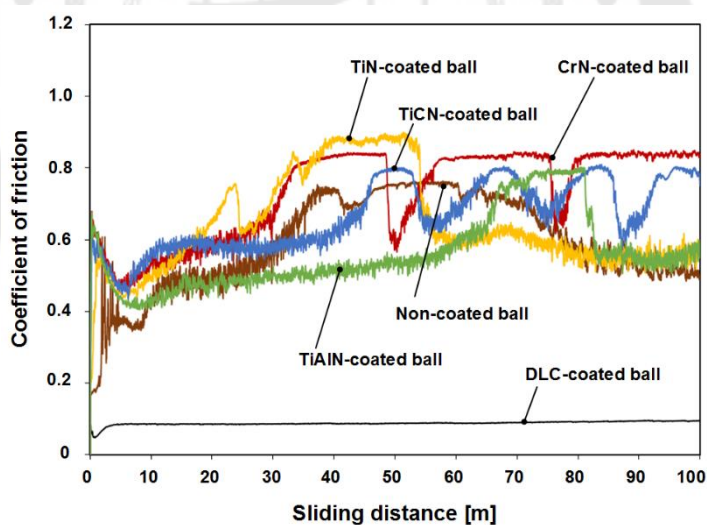
ภาพประกอบ 58 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1095 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 100 mm/s



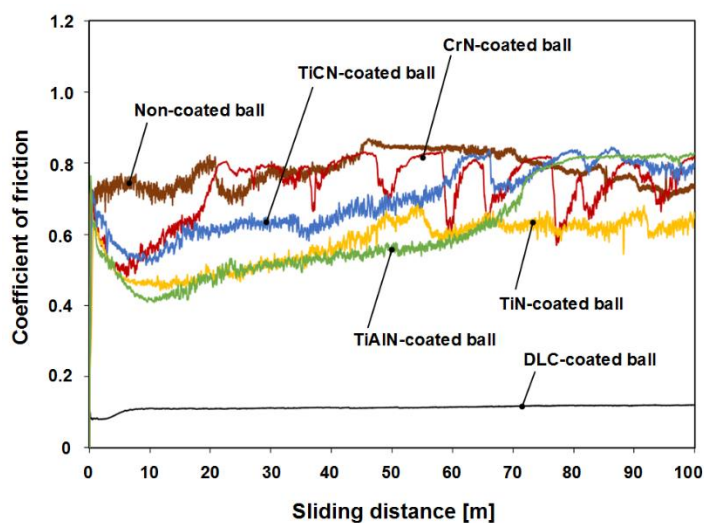
ภาพประกอบ 59 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1095 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 150 mm/s



ภาพประกอบ 60 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1280 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 50 mm/s

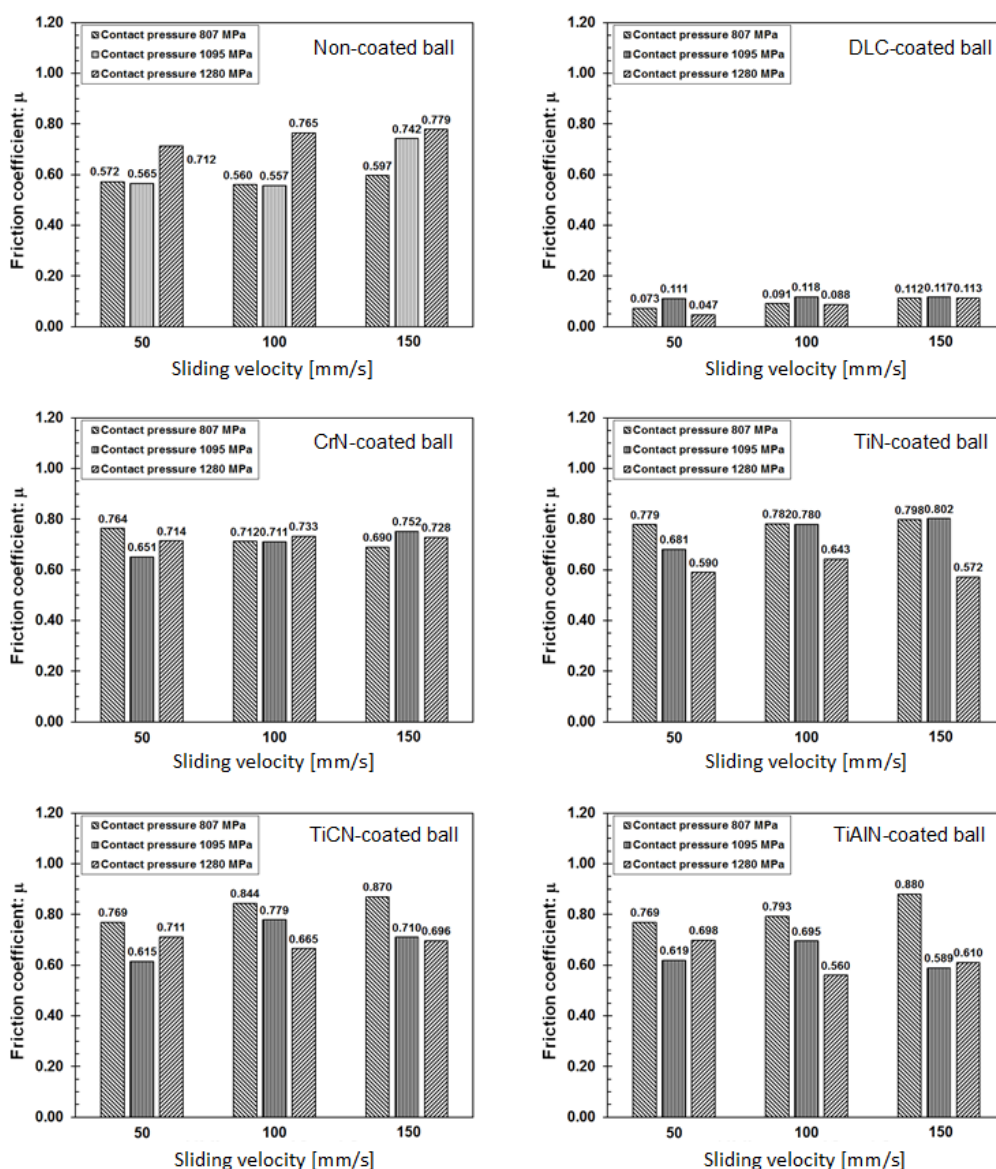


ภาพประกอบ 61 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1280 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 100 mm/s



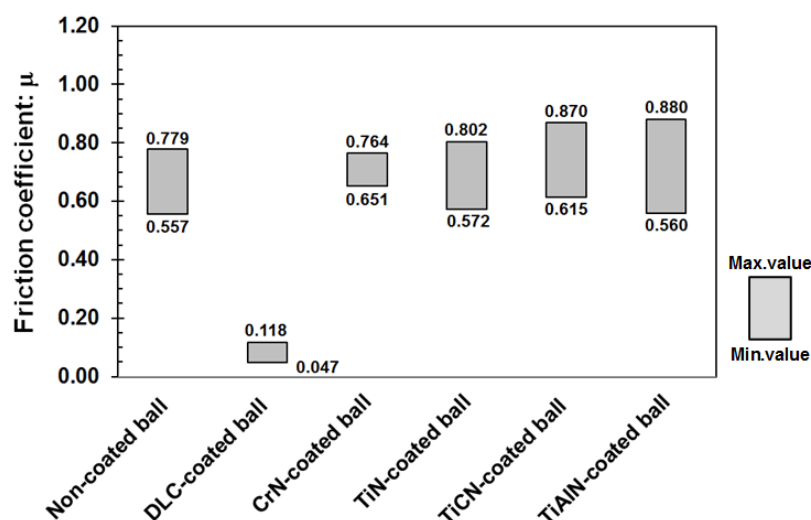
ภาพประกอบ 62 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสบอล SKD11 ที่เคลือบและ
ไม่เคลือบฟิล์มแข็งกับวัสดุชิ้นงาน ที่ความแรงดันสัมผัส 1280 MPa ความเร็วการเคลื่อนที่ 150
mm/s

จากภาพดังกล่าวลักษณะของเส้นกราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบอลที่เคลือบด้วยฟิล์ม DLC จะมีค่าต่ำสุดและมีลักษณะเป็นเส้นเรียบไม่มีค่าแกว่งขึ้น-ลง เหมือนเส้นกราฟของบอล SKD11 ที่ไม่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งและเคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิด CrN, TiN, TiCN และ TiAlN ทั้งนี้กราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่แกว่งขึ้น-ลง เป็นผลเนื่องมาจากผิวคู่สัมผัสเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวบอลแล้วเกิดการหลุดในลักษณะสลับไป-มา [45, 57, 61, 62] ซึ่งฟิล์มแข็งแต่ละชนิดมีความรุนแรงในการแกว่งของเส้นกราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาวะการเกิดการยึดติดและหลุดของวัสดุชิ้นงานดังที่ได้กล่าวข้างต้น



ภาพประกอบ 63 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยของผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน

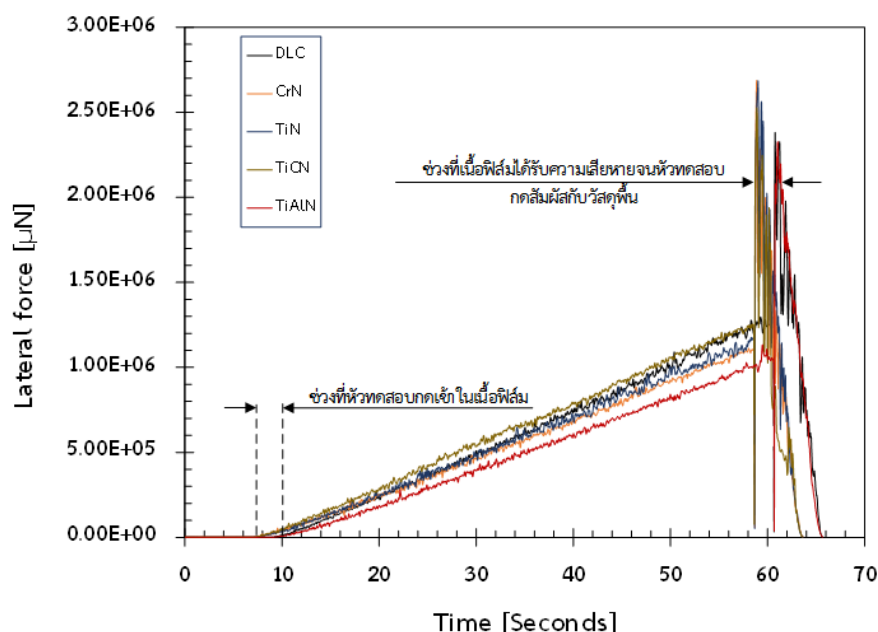
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบแบ่งตามชนิดผิวคู่สัมผัส ดังผลในภาพประกอบ 63 พบว่าบอลไม่เคลือบผิว (Non-coated ball) เคลือบผิวบอลด้วยฟิล์มแข็ง ชนิด DLC (DLC-coated ball) เคลือบผิวบอลด้วยฟิล์มแข็งชนิด CrN (CrN-coated ball) เคลือบผิวบอลด้วยฟิล์มแข็งชนิด TiN (TiN-coated ball) เคลือบผิวบอลด้วยฟิล์มแข็งชนิด TiCN (TiCN-coated ball) และ เคลือบผิวบอลด้วยฟิล์มแข็งชนิด TiAlN (TiAlN-coated ball) กับผิววัสดุชิ้นงาน เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA สามารถแบ่งเป็นช่วงระหว่างค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดได้ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 64 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยของผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน

จากภาพประกอบ 64 มีเพียงบอลที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิด DLC ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ต่ำ คือ 0.047 ถึง 0.118 ในขณะที่บอล SKD11 ที่ไม่ได้เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งกลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นฐานจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ในช่วงค่าสูงระหว่าง 0.557 ถึง 0.880 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มแข็งชนิด DLC มีสมบัติทางไตรบอโลยีดีที่สุดกับผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบด้วยไทรบอมิเตอร์

เหตุผลที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มแข็งชนิด DLC ที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มแข็งชนิดอื่นเป็นผลมาจากค่าความแข็งของฟิล์มที่สูงมากและผิวของฟิล์มมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยที่สุด [64] และในงานวิจัยของ พงศราญ ไกรดำ [65] ที่อธิบายว่าโครงสร้างของฟิล์ม DLC มีลักษณะโครงสร้างส่วนหนึ่งเป็นกราไฟท์ (Graphite) ที่มีการหลุดตัวออกเป็นชั้นๆ เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคู่สัมผัส จึงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ สำหรับกลุ่มของฟิล์มที่มีไนโตรเจน (N) และ ไทเทเนียม (Ti) เป็นฐาน เช่น ฟิล์มชนิด TiN เมื่อฟิล์มแข็งชนิดดังกล่าวเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคู่สัมผัส ณ อุณหภูมิห้อง และเมื่อฟิล์มได้รับความเสียหาย จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับฟิล์ม TiN โดยมีการจับตัวของ TiO_2 และ NO_2 กับแก๊สที่ตกค้างในอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง (Ambient air) จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง

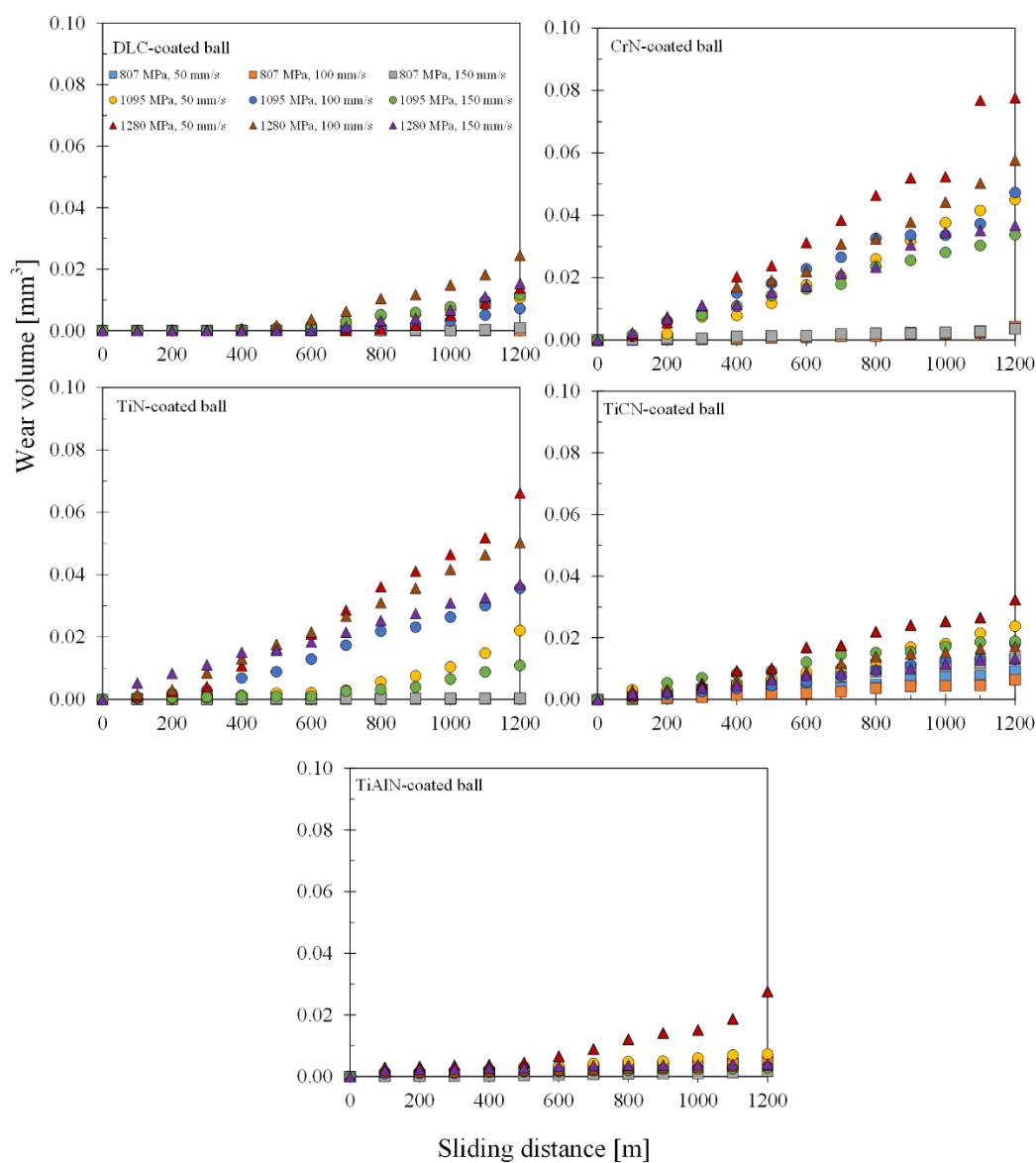


ภาพประกอบ 65 ผลการทดสอบการขีดข่วนบนผิวฟิล์มแข็ง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการขีดข่วนบนผิวฟิล์มในระดับนาโนด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ HYSITRON รุ่น Ti Premier เพื่อดูความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มกับวัสดุพื้น SKD11 ผ่านการชุบแข็ง ดังภาพประกอบ 65 พบว่า ฟิล์มแข็งทุกชนิดมีความสามารถในการยึดเกาะกับผิวของวัสดุพื้นในช่วงใกล้เคียงกัน (พิจารณาช่วงที่เนื้อฟิล์มได้รับความเสียหายจนปลายหัวทดสอบกดสัมผัสกับวัสดุพื้น) แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบ ฟิล์มที่มีค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยการกดในระดับนาโนต่ำ อย่างฟิล์มชนิด DLC จะถูกหัวกดเจาะในแนวตั้งฉากกับผิวฟิล์มเข้าไปเนื้อฟิล์มได้เร็วกว่า (พิจารณาช่วงที่หัวทดสอบกดเข้าไปในเนื้อฟิล์ม) และในขณะที่หัวทดสอบยังคงเคลื่อนที่ในแนวระนาบเพื่อลากครูดไปในเนื้อฟิล์ม จะส่งผลให้แรงกระทำด้านข้างกับรอยทดสอบ (Lateral force) บนผิวฟิล์มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งพิจารณาได้จากเส้นกราฟ และเมื่อหัวทดสอบถูกลากครูดจนเนื้อฟิล์มได้รับความเสียหายถึงจุดที่หัวทดสอบสัมผัสกับวัสดุพื้นจะส่งผลให้เส้นกราฟพุ่งขึ้นและลงอย่างรวดเร็ว (พิจารณาช่วงที่เนื้อฟิล์มได้รับความเสียหายจนกดสัมผัสกับวัสดุพื้น) กลับพบว่า ฟิล์มชนิด DLC ยังคงมีความสามารถทางไตรบอโลยีที่ดีในการป้องกันหัวทดสอบกดและลากสัมผัสกับผิวของวัสดุพื้นแม้ว่าจะมีความแข็งของฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุพื้น SKD11 ผ่านการชุบแข็งก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้จาก Ball-on-Disk

4.5.3 การสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ

ปริมาตรการสึกหรอของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ชุบแข็งที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ เมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 BA บนสภาพไม่ใช้หล่อลื่นภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ศึกษาแสดงดังภาพประกอบ 66



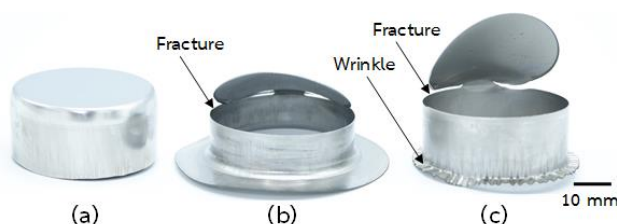
ภาพประกอบ 66 กราฟปริมาตรการสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทดสอบต่าง ๆ

นอกจากค่าความแข็งของฟิล์ม DLC จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส ยังส่งผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือด้วย ผลการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของลูกบอลที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ ดังภาพประกอบ 66 แสดงให้เห็นว่า ความแข็งของฟิล์มช่วยป้องกันความเสียหายแก่เนื้อฟิล์มและวัสดุพื้น (Substrate) ต่อการเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ส่งผลให้มีพื้นที่สัมผัสกับวัสดุผิวคู่สัมผัสต่ำ โดยเฉพาะเมื่อต้องถูกใช้งานในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงอย่างเช่นกระบวนการลากขึ้นรูป อิทธิพลของความแข็งฟิล์มต่อปริมาตรการสึกหรอนั้นสามารถยืนยันจากพฤติกรรมการสึกหรอของลูกบอลที่เคลือบฟิล์ม TiCN และ TiAlN ซึ่งมีค่าความแข็งของฟิล์มรองจากฟิล์ม DLC ในขณะที่ลูกบอลเคลือบด้วยฟิล์ม CrN และ TiN ที่มีค่าความแข็งต่ำอยู่ในช่วง 1700 – 2500 HV จะมีพฤติกรรมการสึกหรอเพิ่มขึ้นรวดเร็วอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น มีเพียงการทดสอบภายใต้ความดันสัมผัสต่ำอย่าง 807 MPa ที่ฟิล์ม CrN และ TiN แสดงพฤติกรรมการสึกหรอที่ได้เปรียบกว่าลูกบอลที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiCN ดังนั้นค่าความแข็งของฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุทำแม่พิมพ์ช่วยป้องกันการสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์ได้ เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการศึกษาในตารางที่ 12 พบว่าค่าความแข็งของฟิล์มไม่ได้ช่วยป้องกันปัญหาการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวเครื่องมือ ซึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับงานขึ้นรูปเย็น การยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวเครื่องมือ นั่นถือเป็นตัวชี้วัดตัวหนึ่งในการกำหนดอายุการใช้งานของเครื่องมือ ดังนั้นผู้ออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นต้องเลือกใช้ฟิล์มแข็งให้เหมาะสมต่อชนิดของวัสดุผิวคู่สัมผัสด้วย

4.6 พฤติกรรมการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

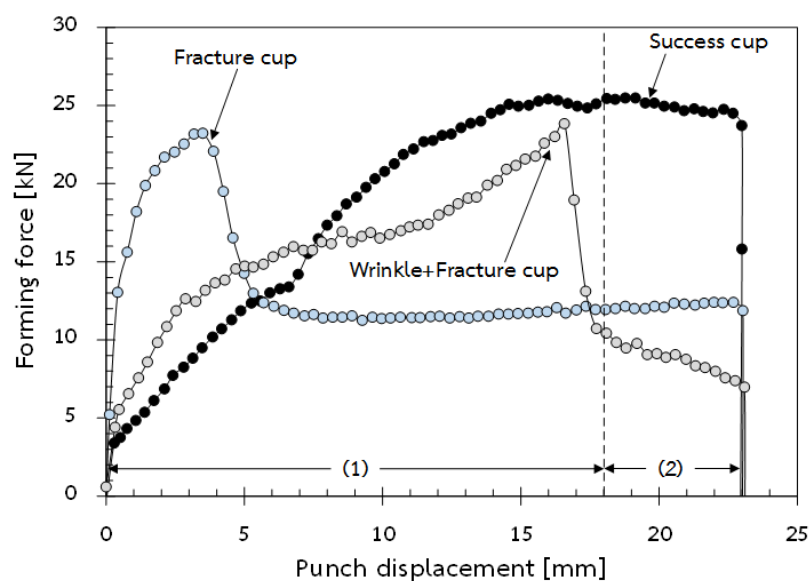
4.6.1 ลักษณะขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน

จากการศึกษาพฤติกรรมการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm ด้วยการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นภายใต้ตัวแปรต้น คือ ขนาดองศาของมุมพั่นซ์ ขนาดรัศมีของมุมตาย และแรงจับยึดแผ่นขึ้นงาน พบว่ามีลักษณะของขึ้นงานอยู่ 3 รูปแบบ ดังภาพประกอบ 67



ภาพประกอบ 67 ลักษณะขึ้นงานที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมการลากขึ้นรูป

ภาพประกอบ 67 (a) แสดงชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปได้สำเร็จ ภาพประกอบ 67 (b) แสดงชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปไม่สำเร็จเนื่องจากเกิดการแตก (Fracture) ของวัสดุชิ้นงานที่บริเวณก้นถ้วย และภาพประกอบ 67 (c) แสดงชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปไม่สำเร็จเนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkle) บริเวณปากของชิ้นงานและบริเวณก้นถ้วยชิ้นงานเกิดการแตกของเนื้อวัสดุร่วมด้วย ทั้งนี้รูปแบบของลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมการลากขึ้นรูปสามารถศึกษาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch (Punch displacement) เทียบกับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน (Forming force) ดังภาพประกอบ 68 ซึ่งแรงดังกล่าวจะเป็นผลรวมของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder force) กับแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน (Deep drawing force) เมื่อพิจารณาระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch เทียบกับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น SUS304 BA จากภาพประกอบดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมการลากขึ้นรูปชิ้นงาน ตามลักษณะชิ้นงานที่ได้ดังภาพประกอบ 67 ด้วย



ภาพประกอบ 68 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch เทียบกับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

กรณีชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปได้สำเร็จ (Success cup): ในช่วงต้นของช่วงที่ (1) ค่าของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพunchลากพาชิ้นงานให้ไหลตัวเข้าไปในดาย ในขณะที่แผ่นจับยึดชิ้นงานก็จะให้แรงคงที่แก่วัสดุชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะถูกลากขึ้นรูปจนสำเร็จที่ระยะทางการเคลื่อนที่ของพunchเท่ากับ 18 mm ซึ่งเป็นระยะที่เท่ากับความสูงของถ้วยชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปได้สำเร็จ อย่างไรก็ตามผู้ศึกษาได้กำหนดระยะ

ทางการเคลื่อนที่ของพันธให้เคลื่อนที่ไปจนถึงระยะ 23 mm ดังนั้น ช่วงที่ (2) จึงเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ของพันธหลังจากระยะ 18 mm ซึ่งพันธจะยังคงลากพาขึ้นงานที่ถูกขึ้นรูปสำเร็จเข้าไปในตายจนถึงระยะทางการเคลื่อนที่ของพันธเท่ากับ 23 mm แรงก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเครื่องเพรสพาพันธเคลื่อนที่ขึ้นกลับสู่ตำแหน่งเดิมตามระยะทางที่ผู้ศึกษากำหนด

กรณีขึ้นงานที่ลากขึ้นรูปไม่สำเร็จเนื่องจากเกิดการแตก (Fracture cup): ณ ช่วงที่ (1) ลักษณะของกราฟจะมีความชันมากกว่ากรณีอื่น เนื่องจากการให้แรงจับยึดแผ่นขึ้นงานที่สูงส่งผลให้แรงที่ต้องใช้ขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากต้องเอาชนะแรงจับยึดแผ่นขึ้นงาน เมื่อพันธเคลื่อนที่ลากพาขึ้นงานไปที่ระยะ 4 mm โลหะแผ่นขึ้นงานซึ่งถูกแผ่นจับยึดขึ้นงานรั้งไม่ให้เกิดการไหลตัว ขึ้นงานจึงเกิดการแตกทำให้กราฟแรงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่พันธยังคงที่ลากพาขึ้นงานด้วยที่แตกเคลื่อนที่ไป ค่าของแรงจึงคงที่จนถึงระยะทางการเคลื่อนที่ของพันธเท่ากับ 23 mm แรงก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเครื่องเพรสพาพันธเคลื่อนที่ขึ้นกลับสู่ตำแหน่งเดิมตามระยะทางที่ผู้ศึกษากำหนด

กรณีขึ้นงานที่ลากขึ้นรูปไม่สำเร็จเนื่องจากเกิดรอยย่นและการแตก (Wrinkle+Fracture cup): เมื่อกำหนดแรงจับยึดแผ่นขึ้นงานที่น้อยเกินไปขึ้นงานจะเกิดรอยย่นที่บริเวณปีกของขึ้นงาน ทำให้การไหลตัวของขึ้นงานผ่านบาดายเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มสูงกว่าแรงที่ใช้เพื่อขึ้นรูปขึ้นงานทั่วไปที่ไม่เกิดรอยย่น และเมื่อพันธยังคงเคลื่อนที่ลากพาขึ้นงานให้ไหลผ่านตายในขณะที่รอยย่นก็เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง รอยย่นดังกล่าวจะถูกรีดผ่านบาดายจนขึ้นงานไหลไม่สะดวกก็จะเกิดการแตกของวัสดุขึ้นงานก่อนถึงระยะที่จะขึ้นรูปสำเร็จ ทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานลดลงจนถึงสุดช่วงที่ (2) แรงก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเครื่องเพรสพาพันธเคลื่อนที่ขึ้นกลับสู่ตำแหน่งเดิมตามระยะทางที่ผู้ศึกษากำหนด

4.6.2 อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูปที่มีต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สำคัญได้แก่ ขนาดรัศมีของมุมตาย (Die corner radius) ขนาดองศาของมุมพันธ (Punch corner angle) แรงจับยึดแผ่นขึ้นงาน (Blankholder force) และชนิดของสารหล่อลื่น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารหล่อลื่นชนิดเดียวกับที่โรงงานกรณีศึกษาใช้ดังได้กำหนดไว้ในขอบเขตของงานวิจัย สำหรับตัวแปรขนาดรัศมีของมุมพันธนั้นผู้วิจัยได้เลือกศึกษาเป็นขนาดองศาของมุมพันธแทน เนื่องจากแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปของโรงงานกรณีศึกษาไม่ได้ใช้การปรับแต่งรัศมีของมุมพันธแต่เป็นการปรับแต่งด้วยองศาของมุมพันธแทน

ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูปที่มีต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานผู้วิจัยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนการขึ้นรูป (Drawing ratio; DR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้นที่ต้องการลากขึ้นรูปต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพunch ทั้งนี้ผลของการศึกษาที่ได้จะนำไปใช้ตัดสินใจเลือกตัวแปรของกระบวนการในการศึกษาการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยฟิล์มแข็ง โดยจากตาราง 13 พบว่าตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่ศึกษามีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ชีตจำกัดการขึ้นรูปสูงสุด (Limiting drawing ratio; LDR) ในทดลองลากขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวด้วยตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปที่ศึกษา คือ 1.9 แต่ต้องใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่มีรัศมีของมุมคายกับองศาของมุมพunchที่เป็นค่ามากที่สุด คือ เท่ากับ 2.5 mm และ 30 degree ตามลำดับ ด้วยแรงจับยึดแผ่นขึ้นงานขนาด 8 kN

สำหรับอัตราส่วนขึ้นรูป 1.7 ซึ่งเป็นอัตราส่วนขึ้นรูปที่ทางบริษัทกรณีศึกษาใช้ขึ้นรูปขึ้นงานตามภาพประกอบ 1 สามารถเลือกใช้ตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปได้มากที่สุด โดยเฉพาะการใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่มีรัศมีมุมคายมาก และใช้แรงจับยึดแผ่นขึ้นงานเท่ากับ 8 kN ซึ่งสามารถลากขึ้นรูปขึ้นงานถ้วยได้สำเร็จกับพunchที่มีมุมองศาทุกค่าที่ผู้วิจัยศึกษา โดยตัวแปรที่โรงงานกรณีศึกษาใช้ในการผลิตขึ้นงานตามภาพประกอบ 1 เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนแล้วได้แก่ รัศมีของมุมคายเท่ากับ 1.5 mm องศาของมุมพunchเท่ากับ 15 degree และแรงจับยึดแผ่นขึ้นงานเท่ากับ 8 kN ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงการขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนขึ้นรูป 1.7 ตามตาราง 13

ตาราง 13 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูปที่มีต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน

Drawing ratio	Blankholder force [kN]	Die corner radius [mm]	Punch corner angle [degree]		
			0	15	30
1.7	5	0.5	⊗	×	⊕
		1.5	⊗	⊕	⊕
		2.5	×	⊕	⊗
	8	0.5	×	×	⊕
		1.5	⊕	⊕	⊕
		2.5	⊕	⊕	⊕

Drawing ratio	Blankholder force [kN]	Die corner radius [mm]	Punch corner angle [degree]		
			0	15	30
	12	0.5	×	×	⊕
		1.5	×	×	⊕
		2.5	⊕	⊕	×
1.8	5	0.5	×	⊗	⊗
		1.5	×	⊗	⊗
		2.5	⊗	⊗	⊕
	8	0.5	×	×	×
		1.5	×	×	×
		2.5	×	×	⊕
	12	0.5	×	×	×
		1.5	×	×	×
		2.5	×	×	⊕
1.9	5	0.5	⊗	⊗	⊗
		1.5	⊗	⊗	⊗
		2.5	⊗	⊗	⊗
	8	0.5	⊗	⊗	⊗
		1.5	⊗	⊗	⊗
		2.5	⊗	⊗	⊕
	12	0.5	⊗	⊗	⊗
		1.5	⊗	⊗	⊗
		2.5	⊗	⊗	×
2.0	5	0.5	×	×	×
		1.5	×	×	×
		2.5	×	×	×
	8	0.5	×	×	×
		1.5	×	×	×
		2.5	×	×	×

Drawing ratio	Blankholder force [kN]	Die corner radius [mm]	Punch corner angle [degree]		
			0	15	30
	12	0.5	×	×	×
		1.5	×	×	×
		2.5	×	×	×

Remark: ⊕ Success cup, × Fracture cup, ⊗ Wrinkle+Fracture cup

ตาราง 14 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งในการลากขึ้นรูป

ตัวแปรกระบวนการ	ค่า [หน่วย]
ขนาดของมุมของมุมพ่นซ์	15 [degree; (°)]
ขนาดรัศมีของมุมตาย	1.5 [mm]
ความเร็วในการลากขึ้นรูป	7.0 [mm/sec]
ระยะการเคลื่อนที่ของพ่นซ์	11.5 [mm]
แรงจับยึดชิ้นงาน	8.0 [kN]
อัตราส่วนการลากขึ้นรูป	1.7

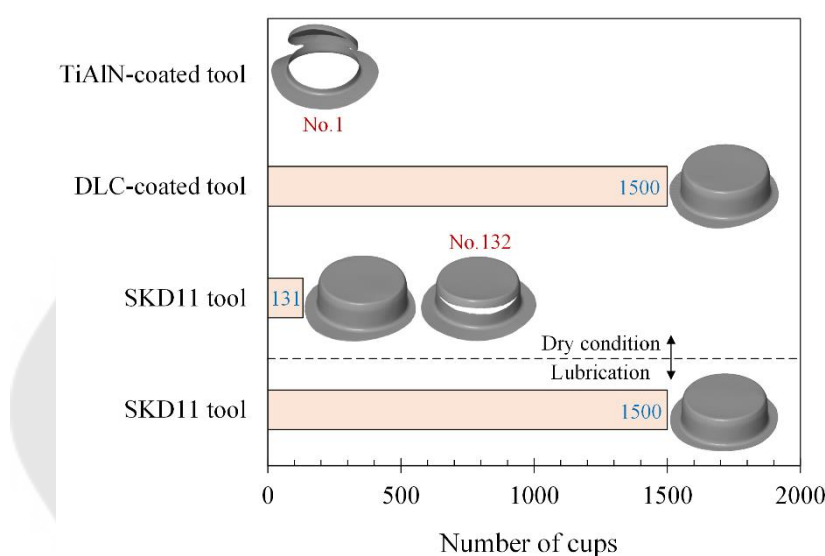
4.7 ประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA

จากผลการศึกษาให้หัวข้อ 4.6.2 ในส่วนของค่าขีดจำกัดการลากขึ้นรูปตัวแปรที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปมีความสอดคล้องกับการขึ้นรูปปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นสัดส่วนของขนาดชิ้นงานที่ผู้วิจัยทำการลดขนาดลงให้อยู่ในขนาดของการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA เป็นไปตามตาราง 14

ผู้วิจัยเลือกฟิล์มแข็งชนิด DLC และชนิด TiAlN ซึ่งมีสมบัติทางไทรบอโลยีที่ดีและแย่ที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.5 มาทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA พร้อมเปรียบเทียบผลการศึกษากับการทดสอบด้วยชุดแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบด้วยฟิล์มแข็งทั้งกรณีใช้สารหล่อลื่นและไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยเงื่อนไขการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตาราง 15

ตาราง 15 เงื่อนไขสภาพทางไทรบอโลยีในการทดสอบลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน

ชนิดของแม่พิมพ์	สภาพการหล่อลื่น
SKD11 ชุบแข็ง ตัวที่ 1	ใช้สารหล่อลื่น
SKD11 ชุบแข็ง ตัวที่ 2	ไม่ใช้สารหล่อลื่น
SKD11 ชุบแข็ง เคลือบผิวด้วยฟิล์มชนิด DLC	ไม่ใช้สารหล่อลื่น
SKD11 ชุบแข็ง เคลือบผิวด้วยฟิล์มชนิด TiAlN	ไม่ใช้สารหล่อลื่น



ภาพประกอบ 69 จำนวนถ้วยที่สามารถลากขึ้นรูปได้ด้วยแม่พิมพ์ภายใต้สภาวะทางไทรบอโลยีต่างๆ

4.7.1 ความสามารถในการลากขึ้นรูป

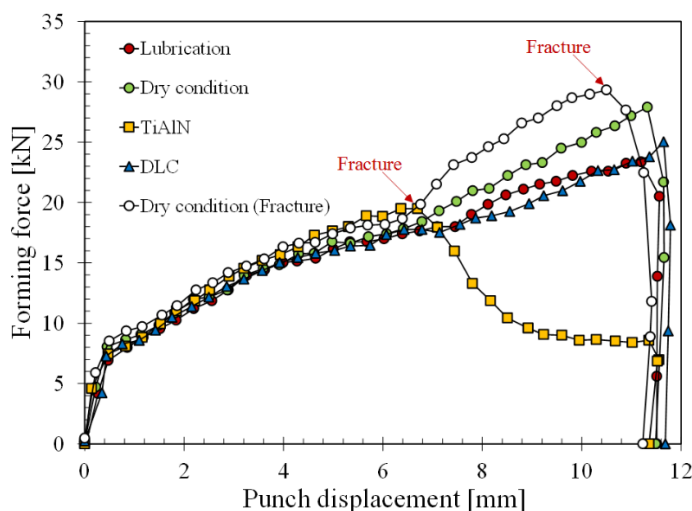
ความสามารถในการลากขึ้นรูปของแม่พิมพ์ที่มีชนิดและสภาพการหล่อลื่นที่แตกต่างกันดังตารางที่ 15 ภายใต้ตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปเดียวกันถูกสมมติฐานว่าส่งผลต่อสภาพทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุขึ้นงานแตกต่างกัน ถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบด้วยจำนวนชิ้นงานถ้วยสำเร็จที่ขึ้นรูปได้โดยไม่พบการแตกหรือฉีกขาด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 68

จากภาพประกอบ 69 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiAlN ไม่สามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้เนื่องจากเกิดการแตกของวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไว้สนิมขณะทำการลากขึ้นรูปภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นตั้งแต่การขึ้นรูปครั้งแรก เมื่อทดลองขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นช่วย

ปรับปรุงสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส ก็ยังคงไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมได้เนื่องจากพบลักษณะความเสียหายของวัสดุชิ้นงานเช่นเดียวกับกรณีการลากขึ้นรูปโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ในขณะที่แม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ชุบแข็งสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นได้ 131 ชิ้น หลังจากนั้นพบการฉีกขาดของวัสดุชิ้นงานกับถ้วยขึ้นที่ 132 แต่เมื่อใช้สารหล่อลื่นช่วยในการลากขึ้นรูปแม่พิมพ์ SKD11 ชุบแข็งสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้มากกว่า 1500 ชิ้น

แม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์ม DLC แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพทางไทรบอโลยีในการทำงานบนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากการจำลองการทดสอบทางไทรบอโลยี โดยสามารถลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมได้มากกว่า 1500 ชิ้น ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น เช่นเดียวกับกรณีลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ SKD11 ชุบแข็ง โดยใช้สารหล่อลื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเคลือบแข็งมีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA

พฤติกรรมการลากขึ้นรูปด้วยถูกเปรียบเทียบกับกราฟแรงขึ้นรูป (รวมแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานขนาด 8 kN) เทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพังก์แสดงดังภาพประกอบ 70 เมื่อพังก์สัมผัสชิ้นงานและเคลื่อนที่ลากพาชิ้นงานให้เคลื่อนที่ผ่านรัศมีตายค่าของแรงขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากต้องเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานโลหะแผ่นกับผิวของแผ่นยึดจับชิ้นงาน และผิวชิ้นงานโลหะแผ่นกับผิวของตาย โดยในช่วงนี้โลหะแผ่นจะถูกดัดงอ (Bend) ด้วยรัศมีมุมพังก์กับรัศมีมุมตาย ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเป็นมุมก้นถ้วย เมื่อพังก์ยังคงเคลื่อนที่ส่งผลให้แรงยังคงเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากชิ้นงานถูกลากผ่านรัศมีตายจากการเคลื่อนที่ของพังก์เกิดเป็นผนังถ้วย (Side-wall) โดยแรงในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่ของพังก์เพิ่มขึ้นจนถึงสุดระยะการขึ้นรูป (11.5 mm) เมื่อพังก์เคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นแรงจึงตกลงอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีที่การขึ้นรูปแล้วโลหะแผ่นได้รับความเสียหาย ณ ตำแหน่งนั้นกราฟแรงขึ้นรูปก็จะลดลงเร็วอย่างรวดเร็ว เช่น กราฟของโลหะแผ่นที่ถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบฟิล์มกับเคลือบฟิล์ม TiAlN ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น



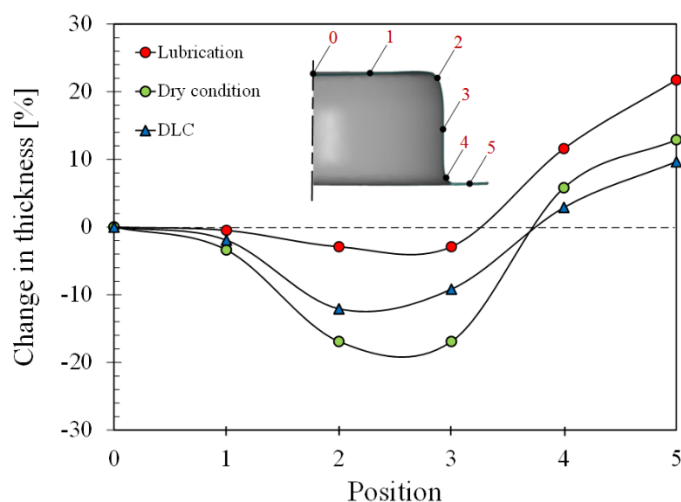
ภาพประกอบ 70 แผนภาพแรงขึ้นรูปและระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch

4.7.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป

ตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปสมมติฐานให้ความหนาของวัสดุชิ้นงานคงที่ตลอดการขึ้นรูป [6] แต่เมื่อตรวจสอบค่าความหนาของวัสดุชิ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูปเป็นถ้วยพบว่าถ้วย ที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แต่ละชนิดมีความหนาเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ บนถ้วยดังภาพประกอบ 71 ซึ่งถูกตรวจสอบจากถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปครั้งแรก (สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA หลังการลากขึ้นรูป ผู้ศึกษาไม่ได้นำชิ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เคลือบฟิล์ม TiAlN มาพิจารณาเนื่องจากชิ้นงานเกิดการแตกร้าวแต่การขึ้นรูปครั้งแรกจึงไม่สามารถตรวจสอบความหนาของวัสดุชิ้นงานบนถ้วยก่อนเกิดความเสียหายได้)

ค่าเฉลี่ยร้อยละของความหนาวัสดุชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของถ้วย ที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์และเงื่อนไขที่แตกต่างกันดังภาพประกอบ แสดงให้เห็นว่ามีเพียงตำแหน่งบริเวณกลางของก้นถ้วย (ตำแหน่ง 0) ที่ความหนาของวัสดุชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความหนาของวัสดุชิ้นงาน ณ ตำแหน่งอื่นมีการเพิ่มและลดขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนถ้วย โดยตำแหน่ง 1, 2 และ 3 มีความหนาของวัสดุชิ้นงานลดลง ในขณะที่ตำแหน่ง 4 และ 5 มีความหนาของวัสดุชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาของวัสดุชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เกิดจากการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานขณะถูกแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาของถ้วยที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า ตำแหน่งที่ 2 ของถ้วยมีความหนาของวัสดุชิ้นงานลดลงสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการแตกของถ้วย ซึ่งในการทดลองที่

ผ่านมาพบการฉีกขาดของเนื้อวัสดุ ณ บริเวณตำแหน่งดังกล่าว ในขณะที่ตำแหน่งที่ 5 ของถ้วย ขึ้นงานซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นสูงที่สุด จะพบการเกิดการย่นที่บริเวณตำแหน่งดังกล่าว



ภาพประกอบ 71 ความหนาของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูป

เมื่อเปรียบเทียบความหนาของถ้วยขึ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบฟิล์ม ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น จะมีความหนาของวัสดุขึ้นงานบริเวณตำแหน่ง 2 และ 3 ลดลงสูงกว่ากรณีถ้วยขึ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เคลือบฟิล์ม DLC ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น ในขณะที่การลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้สภาวะการใช้สารหล่อลื่น จะมีความหนาลดลงน้อยที่สุดที่บริเวณตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าการลดลงของความหนาถ้วยสูงจะส่งผลให้วัสดุขึ้นงานได้รับความเสียหายจากการฉีกขาดได้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสภาพทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่ดีช่วยให้วัสดุขึ้นงานเคลื่อนไหลเข้าไปในตายขณะที่พันธเคลื่อนที่ได้ง่าย ส่งผลให้เนื้อวัสดุขึ้นงานไม่ถูกต้านการไหลตัว ทำให้ความหนาของวัสดุขึ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากรณีพื้นผิวคู่สัมผัสมีสภาพทางไทรบอโลยีที่ไม่ดี ดังนั้นสภาพทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสจึงมีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA

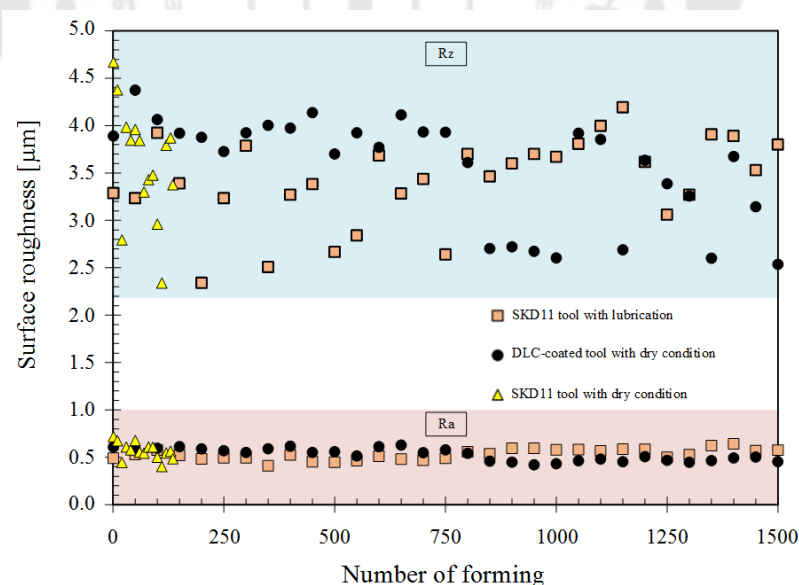
4.7.3 ความหยาบผิวของถ้วยขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูป

ขึ้นงานถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม DLC ถูกนำมาตรวจสอบค่าความหยาบผิว R_a โดยเปรียบเทียบกับกรณีขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบฟิล์มในสภาวะใช้สารหล่อลื่นซึ่งเป็น

วิธีการเดิมในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวประกอบ 1 ของบริษัทกรณีศึกษา ผลการวัดค่าความหยาบผิวของถ้วยชิ้นงานที่ได้ด้วยแม่พิมพ์และเงื่อนไขการใช้และไม่ใช้สารหล่อลื่นแสดงดังภาพประกอบ

72

จากผลค่าความหยาบผิวแสดงให้เห็นว่าวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ที่ถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์และเงื่อนไขการลากขึ้นรูปเดียวกันก็มีค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกันแต่ยังอยู่ในช่วงค่าที่ทางบริษัทกรณีศึกษายอมรับได้ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ เมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟ ไม่พบค่าความหยาบผิวของถ้วยชิ้นงานที่มีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งลักษณะกราฟดังกล่าวถูกอธิบายในงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ว่าเกิดจากการครูดของวัสดุชิ้นงานที่ยึดเกาะบนผิวแม่พิมพ์จากการขึ้นรูปก่อนหน้าทำให้เศษวัสดุชิ้นงานดังกล่าวครูดเอาเนื้อวัสดุชิ้นงานเกิดเป็นรอยลึกส่งผลกระทบต่อลักษณะของกราฟค่าความหยาบผิว แต่แม้ว่าจะไม่เกิดการยึดเกาะของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์แต่การลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม DLC ในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นก็ไม่สามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้ในจำนวนมากและยังเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของถ้วยอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ้วยชิ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์ม DLC และกรณีแม่พิมพ์ SKD11 ที่ใช้สารหล่อลื่น



ภาพประกอบ 72 ความหยาบผิวของถ้วยชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ

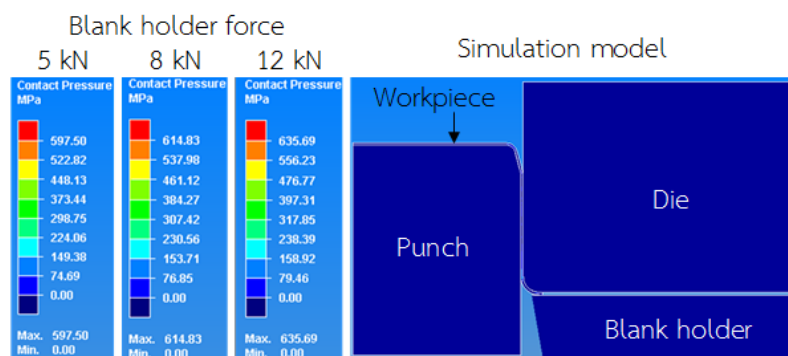


ภาพประกอบ 73 เปรียบเทียบลักษณะสภาพผิวของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน

เมื่อตรวจสอบลักษณะของสภาพผิวดายที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ที่ผ่านการขึ้นรูปจำนวน 1500 ครั้ง และเปรียบเทียบกับสภาพผิวของแม่พิมพ์ดังกล่าว ก่อนทำการขึ้นรูปดังภาพประกอบ 73 พบว่าไม่มีเศษวัสดุขึ้นงานยึดเกาะบนผิวแม่พิมพ์ทั้งกรณีที่เคลือบฟิล์ม DLC และกรณีแม่พิมพ์ SKD11 ที่ขึ้นรูปขึ้นงานโดยใช้สารหล่อลื่น แต่ผิวแม่พิมพ์ดังกล่าวได้รับความเสียหายเนื่องจากถูกใช้งานขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน ดังจะเห็นได้จากค่าความหยาบผิว Ra ที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพผิวแม่พิมพ์ก่อนใช้ขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพผิวดังกล่าวไม่ได้ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของถ้วยขึ้นงานที่ขึ้นรูปได้อย่างมีนัยสำคัญดังพิจารณาได้จากภาพประกอบ 72

4.8 การทดสอบสมบัติทางไดรบอลโยยีด้วยเงื่อนไขภายใต้ตัวแปรกระบวนการลากขึ้นรูป

เพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของสมบัติทางไดรบอลโยยีภายใต้ตัวแปรกระบวนการลากขึ้นรูปตามตาราง 14 ในหัวข้อ 4.7 ส่งผลต่อพฤติกรรมของการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ผู้วิจัยได้ใช้การจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูป ผลการจำลองการลากขึ้นรูปแสดงดังภาพประกอบ 74



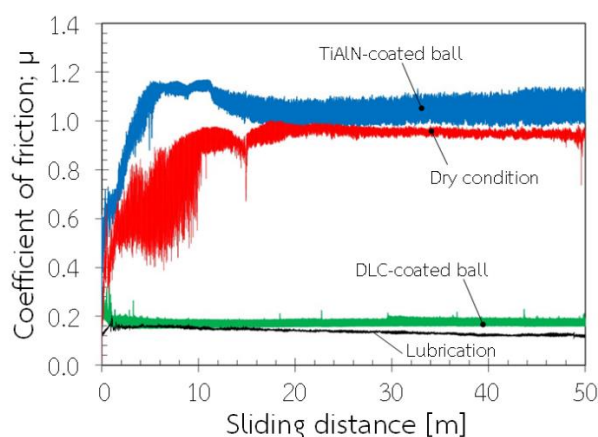
ภาพประกอบ 74 ผลการจำลองการทำงานการลากขึ้นรูปเพื่อหาค่าความดันสัมผัส

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (4.1)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นจริง [MPa]
 $\bar{\epsilon}$ คือ ความเครียดจริง
 K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ [MPa]
 n คือ ตัวยกกำลังของการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด

จากผลการจำลองการทำงานการลากขึ้นรูปเพื่อหาค่าความดันสัมผัสโดยใช้ข้อมูลของวัสดุจากตาราง 8 ด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังสมการ (4.1) โดยที่ K มีค่าเท่ากับ 1323 MPa และ n มีค่าเท่ากับ 0.4255 ผลการจำลองการทำงานพบว่าเงื่อนไขเมื่อเพิ่มค่าแรงจับยึดแผ่นขึ้นงานจะส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสเพิ่มสูงขึ้นโดยค่าความดันสัมผัสที่สูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปหาได้จากการจำลองการทำงานด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 597 MPa, 614 MPa และ 635 MPa ที่แรงจับยึดแผ่นขึ้นงานเท่ากับ 5 kN, 8 kN และ 12 kN ตามลำดับ แม้ว่าการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานจะใช้แรงจับยึดแผ่นขึ้นงานเท่ากับ 8 kN ที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงสุดเท่ากับ 614 MPa เมื่อคำนวณหาค่าแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ต้องใช้ตุ้มน้ำหนักในการทดสอบขนาดเท่ากับ 0.7 N แต่ในชุดทดสอบไทรบอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยใช้ศึกษามีตุ้มน้ำหนักน้อยสุดขนาดเท่ากับ 1 N ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 1 N หรือเท่ากับ 638 MPa ตามสมการของ Hertzien [48] ในการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์ SKD11 กับวัสดุขึ้นงาน SUS304 BA ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรกระบวนการลากขึ้นรูป ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 7 mm/sec ผลกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสตาม

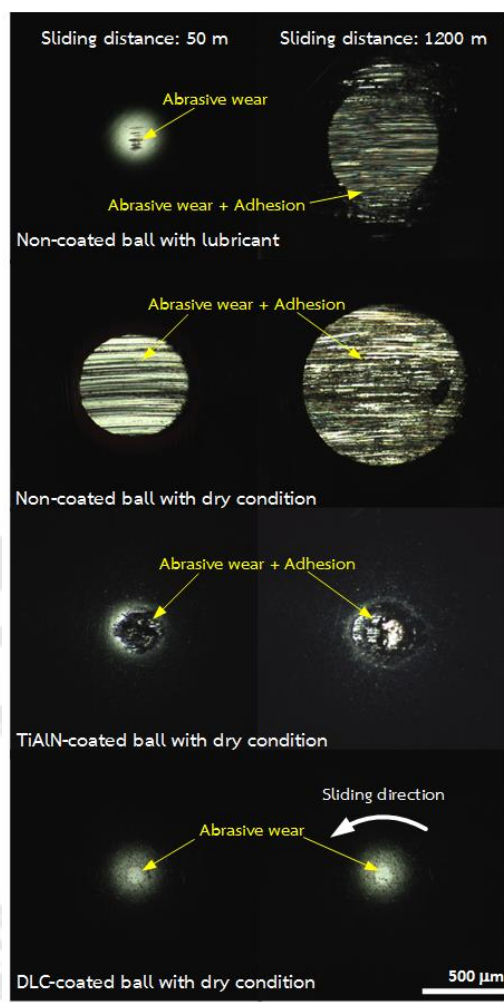
เงื่อนไขสภาพทางไทรบอโลยีในการทดสอบลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานดังตาราง 15 แสดงดังภาพประกอบ 75



ภาพประกอบ 75 กราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายใต้สภาวะและเงื่อนไขการลากขึ้นรูป

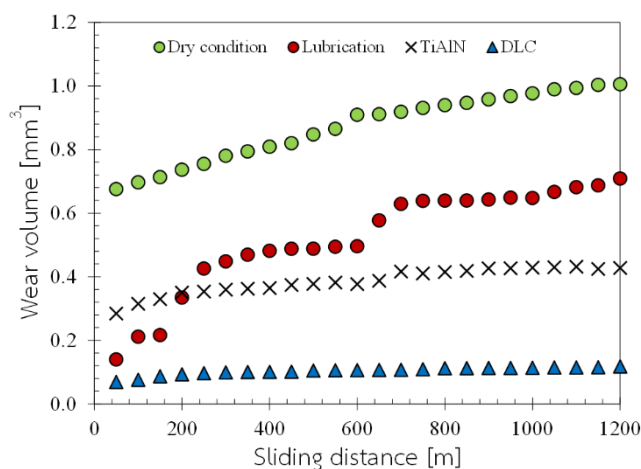
ภาพประกอบ 75 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารหล่อลื่นช่วยลดความเสียดทานระหว่างผิววัสดุคู่สัมผัสได้ ซึ่งประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดของสารหล่อลื่นและผิวของวัสดุคู่สัมผัส จากการทดสอบ Ball-on-Disk ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวของวัสดุเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็งกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ภายใต้การใช้สารหล่อลื่นมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ากรณีไม่ใช้สารหล่อลื่นมากกว่า 6 เท่า ฟิล์ม DLC แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสภายใต้การเคลื่อนที่โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยมีค่าใกล้เคียงกับลูกบอลที่ไม่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งภายใต้การทดสอบที่ใช้สารหล่อลื่น ในขณะที่ฟิล์มที่มีค่าความหยาบผิวสูงอย่าง TiAlN ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น

เมื่อตรวจสอบความเสียหายของวัสดุเครื่องมือดังรูปที่ 76 พบว่าฟิล์ม DLC ที่มีความแข็งสูง มีประสิทธิภาพทางไทรบอโลยีที่ดีในการเคลื่อนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิมแม้ในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยพิจารณาได้จากขนาดของรอยสึกหรบนผิวของลูกบอลที่เคลือบด้วยฟิล์ม DLC ซึ่งมีขนาดเล็กสุด อีกทั้งไม่พบการยึดติดบนผิวลูกบอลแม้จะผ่านการเคลื่อนที่ไป 1200 m ในขณะที่เงื่อนไขการทดสอบอื่นพบรูปแบบความเสียหายแบบขัดถูร่วมกับการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิวของลูกบอล



ภาพประกอบ 76 ลักษณะความเสียหายของบอล SKD11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะทางไดรบอลโลยี
ต่างๆ ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 50 m และ 1200 m

แม้ว่าฟิล์ม TiAlN จะเกิดความเสียหายและพบการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนวัสดุเครื่องมือ แต่ประโยชน์จากค่าความแข็งของฟิล์มดังกล่าวก็ช่วยป้องกันการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือได้ ดังผลการวัดปริมาณการสึกหรอของลูกบอลดังรูปที่ 77 ซึ่งลูกบอล SKD11 ชุบแข็งที่เคลือบฟิล์ม TiAlN มีปริมาณการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่ากรณีลูกบอล SKD11 ชุบแข็งที่ไม่เคลือบฟิล์มแข็ง ทั้งกรณีใช้สารหล่อลื่นและไม่ใช้สารหล่อลื่น



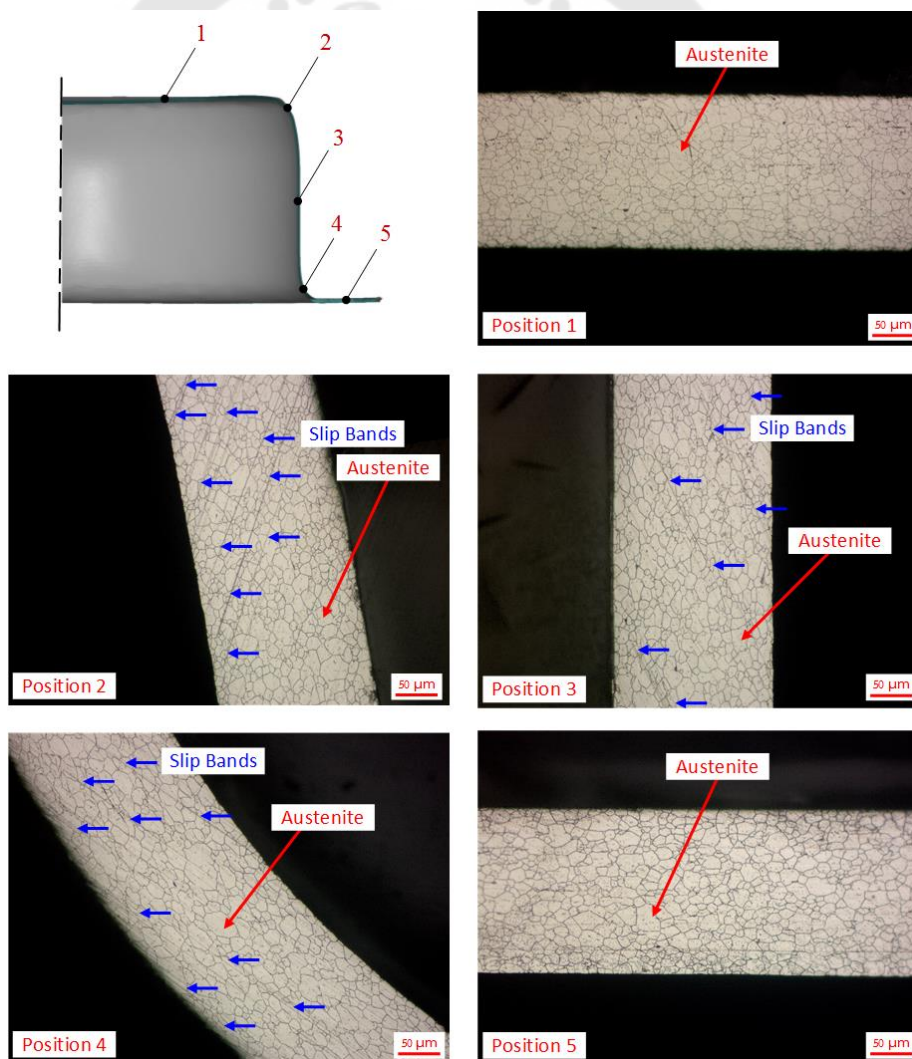
ภาพประกอบ 77 ปริมาตรการสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะทางไทรบอโลยี
ต่างๆ

พฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็งที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งจะเป็นไปในลักษณะเกิดการสึกหรอสูงในช่วงแรก หลังจากนั้นประสิทธิภาพของฟิล์มจะช่วยป้องกันการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือโดยสังเกตได้จากลักษณะกราฟที่มีความชันต่ำ แต่กรณีที่ไม่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งพบว่าปริมาตรการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางการเคลื่อนที่ โดยที่ลูกบอล SKD11 ชุบแข็งที่เคลือบฟิล์ม DLC ซึ่งมีค่าความแข็งสูงที่สุดและมีค่าความหยาบผิวต่ำที่สุด ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการป้องกันการสึกหรอให้แก่วัสดุเครื่องมือแม้ในการทำงานภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น จากผลการทดสอบทางไทรบอโลยีภายใต้ตัวแปรของกระบวนการลากขึ้นรูปเดียวกันแต่มีสภาพทางไทรบอโลยีที่ต่างกันช่วยยืนยันผลการทดสอบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสในหัวข้อ 4.5 คือ ฟิล์ม DLC มีความเหมาะสมในการใช้เคลือบผิววัสดุเครื่องมือเกรด SKD11 ชุบแข็ง เพื่อลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA

4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปถาวรเกิดขึ้นอีกครั้ง เครื่องไวร์ อีดีเอ็มถูกใช้เพื่อตัดด้วยชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ในลักษณะตัดขวาง (Section) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ณ ตำแหน่งต่างๆ บนถัวย ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของถัวยดังภาพประกอบ 78 จากภาพดังกล่าวบริเวณซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรจากการลากขึ้นรูปจะอยู่ ณ

ตำแหน่ง 2, 3 และ 4 ของถ้วยขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ ที่บริเวณดังกล่าวพบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเม็ดเกรนโครงสร้างออสเทนไนต์และแถบเลื่อนตัว (Slip bands) ที่โครงสร้าง กรณีที่มีความรุนแรงของการเปลี่ยนรูปถาวรสูงจะเกิดลักษณะข้างต้นอย่างชัดเจน จากงานวิจัยที่ผ่านมา [20-22] วัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างออสเทนไนต์หากเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรงโครงสร้างออสเทนไนต์ของวัสดุดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Deformation-induced martensitic transformation) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดของวัสดุ แม้ว่าการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของถ้วยขึ้นงานจะไม่พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่ก็เห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนวัสดุขึ้นงาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม



ภาพประกอบ 78 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุขึ้นงานที่ถูกลากขึ้นรูป

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การตรวจสอบโครงสร้าง ส่วนประกอบทางเคมี สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพพบว่าวัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก เกรดตามมาตรฐาน JIS คือ SUS304 BA ซึ่งมีการปรับปรุงสมบัติของผิวให้มีความเงาพิเศษ โดยมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 711 MPa และร้อยละการยืดตัวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 62 จากการดำเนินงานวิจัยโดยการจำลองการทดสอบด้วยไทรบอมิเตอร์เพื่อศึกษาสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงาน และการทดลองลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก เกรด SUS304 BA สำหรับผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ของบริษัทกรณีศึกษาพบว่า ปัญหาสำคัญในการลากขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวคือการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป ซึ่งผู้ศึกษาได้ใช้เทคนิควิศวกรรมพื้นผิวปรับปรุงสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานโดยใช้ฟิล์มแข็งเคลือบบนผิววัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ขนาดรัศมีของมุมตาย ขนาดองศาของมุมพันธ์ และแรงจับยึดแผ่นชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA โดยมีขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงสุด เท่ากับ 1.9 โดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่มีรัศมีของมุมตายกับองศาของมุมพันธ์ที่เป็นค่ามากที่สุด คือ เท่ากับ 2.5 mm และ 30 degree ตามลำดับ ด้วยแรงจับยึดแผ่นชิ้นงานขนาด 8 kN

5.1.2 การเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลวัสดุชิ้นงานเปลี่ยนแปลง

5.1.3 สภาพทางไทรบอโลยีมีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

5.1.4 ความดันสัมผัสมีความสัมพันธ์กับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ เมื่อความดันสัมผัสระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะเกิดความรุนแรงของการยึดติดวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่วัสดุทำแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น

5.1.5 ความเร็วการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ เมื่อให้ความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นจะเกิดความรุนแรงของการยึดติดวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่วัสดุทำแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น

5.1.6 ระยะทางการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ เมื่อระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นจะเกิดความรุนแรงของการยึดติดวัสดุขึ้นงานบนผิวแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น

5.1.7 ระยะทางการเคลื่อนที่กับปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 มีความสัมพันธ์เชิงบวกที่ทุกๆ การทดสอบบนแรงดันสัมผัสที่แตกต่างกัน เมื่อระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะเกิดปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันสัมผัสและให้ความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 จะลดลงเนื่องจากเศษวัสดุขึ้นงานที่เกาะยึดติดบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ช่วยป้องกันเนื้อวัสดุ SKD11 หลุดหรือสึกหรอ

5.1.8 ค่าความแข็งของฟิล์มช่วยป้องกันการสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์ได้ แต่ไม่มีผลต่อความสามารถในการป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA เนื่องจากขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์ต้องเลือกชนิดฟิล์มให้เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป เพราะการเลือกฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการขึ้นรูปเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสนอกจากจะช่วยป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงานบนผิววัสดุแม่พิมพ์และป้องกันแม่พิมพ์สึกหรอแล้ว ฟิล์มแข็งที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มความสามารถในการลากขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปได้ด้วย

5.1.9 ฟิล์มแข็ง DLC มีสมบัติทางไทรบอโลยีดีที่สุดเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA เหมาะสมใช้เคลือบผิวแม่พิมพ์วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 ชูบแข็งเพื่อป้องกันการยึดติดของวัสดุขึ้นงาน

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

5.2.1 ทราบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA

5.2.2 ทราบสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA กับวัสดุทำแม่พิมพ์

5.2.3 ทราบความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA และสมบัติทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุทำแม่พิมพ์กับวัสดุขึ้นงาน

5.2.4 ทราบตัวแปรที่เหมาะสมของกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA ความหนา 0.2 mm

5.2.5 ทราบชนิดฟิล์มแข็งที่เหมาะสมในการลดปัญหาการยึดติดของกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA บนผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการลากขึ้นรูป

5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

5.3.1 แม้ว่างานวิจัยนี้จะทราบถึงชนิดฟิล์มที่เหมาะสมเพื่อใช้ป้องกันการยืดยึดของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA และทราบปัจจัยที่เอื้อให้ง่ายต่อการเกิดการยืดยึดของอนุภาคชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA บนผิวฟิล์มในการลากขึ้นรูป แต่ยังคงไม่สามารถระบุสาเหตุหลักได้ชัดเจนถึงกลไกการเกิดการยืดยึดของวัสดุชิ้นงาน ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมว่ามีปัจจัยใดที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดการยืดยึดของอนุภาควัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

5.3.2 ควรทดสอบลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานเพิ่มเติมจนแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่เคลือบฟิล์ม DLC ได้รับความเสียหายจนไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จ แล้วทำการเปรียบเทียบกับกรณีแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์มแต่ใช้สารหล่อลื่นช่วยในการขึ้นรูป เพื่อทำนายอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และคำนวณหาความคุ้มค่าในการใช้ฟิล์มเคลือบแม่พิมพ์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยีและประกอบการผลิตชิ้น

5.3.2 จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าวัสดุทำแม่พิมพ์ชนิดอื่นที่มีความสามารถในการป้องกันการยืดยึดของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ได้ จึงควรศึกษากับกรณีการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุชนิดอื่นทำแม่พิมพ์

บรรณานุกรม

1. Karlsson, P., et al., *Galling resistance and wear mechanisms for cold-work tool steels in lubricated sliding against high strength stainless steel sheets*. Wear, 2012. 286-287: p. 92-97.
2. Takaki, T., et al., *Evaluation of anti-galling property of sulfurized olefins with overbased calcium sulfonates on stainless steel by cup internal ironing test*. Procedia Engineering, 2017. 207: p. 2292-2297.
3. Wiklund, U., B. Casas, and N. Stavlid, *Evaporated vanadium nitride as a friction material in dry sliding against stainless steel*. Wear, 2006. 261(1): p. 2-8.
4. Hua, M., W. Xicheng, and L. Jian, *Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load*. Wear, 2008. 265(5): p. 799-810.
5. สัญญา คำจริง, เฉลิม ขุนเอียด, and ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ, *ปัญหาการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด SPFC980Y, in การประชุมวิชาการราชมนถดำนเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ*. 2560: โรงแรมเคปราชชา อำเภอสรรคิราชชา จังหวัดชลบุรี.
6. Lange, K., *Handbook of Metal Forming*. 1985: Society of Manufacturing Engineers SME.
7. Schuler Gmb, H., *Metal forming handbook*. 1998: Berlin
New York : Springer-Verlag.
8. วารุณี เปรมานนท์ and พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์, *งานขึ้นรูปโลหะ. เล่มที่ 1 แม่พิมพ์โลหะแผ่น*. 2552, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น.
9. ERC/NSM. 2008.
10. Tschaetsch, H. and A. Koth, *Metal forming practise: Processes - Machines - Tools*. 2006. 1-405.
11. ASTM International, *ASTM E 8/E 8M – 08 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2008.
12. Callister, W. and D. Rethwisch, *Material Science and Engineering – An Introduction*. 2007.

13. Mielink, E.M., *Metalworking Science and Engineering*. 1991, NY: McGraw-Hill College.
14. ภาสพิรุฬห์, ศ., การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
15. Bhushan, B., *Principles and applications of tribology*. 1999: New York : John Wiley & Sons.
16. Schey, J., *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear*. Journal of Applied Metalworking, 1984. 3: p. pp.11-120.
17. Bhushan, B. and B.K. Gupta, *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*. 1991.
18. Mattox, D.M., 2 - Substrate ("Real") Surfaces and Surface Modification, in *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, D.M. Mattox, Editor. 1998, William Andrew Publishing: Westwood, NJ. p. 56-126.
19. ชีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล, เหล็กกล้า (ไร้สนิม) สำหรับงานทนความร้อน. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 2554(62): p. 70-73.
20. Hedström, P., *Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301*, in *Licentiate thesis / Luleå University of Technology*, 2005. 2005.
21. Hedström, P., *Deformation and martensitic phase transformation in stainless steels*, in *Doctoral thesis / Luleå University of Technology 1 jan 1997 → ...*, 2007. 2007.
22. Sahidin Salehudin, S.B., Z. Sajuri, and K.B. Sahidin Salehudin, *Effects of deep drawing process in microstructure of stainless steel S304*, in *2015 Innovation & Commercialization of Medical Electronic Technology Conference (ICMET)*, November 2015, pp.121-125. 2015. p. 121-125.
23. ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี และ ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ, การประเมินสารหล่อลื่นในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียม A1100-O, in *การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ*. 2561: โรงแรมดิวาน่า พลาซ่า อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่.
24. Raju, S., G. Ganesan, and R. Karthikeyan, *Influence of variables in deep drawing*

- of AA 6061 sheet. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010. 20: p. 1856-1862.
25. Padmanabhan, R., et al., *Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel*. Finite Elements in Analysis and Design 43 2007: p. pp.1062 – 1067.
 26. Lin, B.-T., et al., *Improvement of deep drawability by using punch surfaces with microridges*. Journal of materials processing technology, 2015. 225: p. 275-285.
 27. Murakawa, M., N. Koga, and T. Kumagai, *Deep-drawing of aluminum sheets without lubricant by use of diamond-like carbon coated dies*. Surface and Coatings Technology, 1995. 76-77: p. 553-558.
 28. Horiuchi, T., S. Yoshihara, and Y. Iriyama, *Dry deep drawability of A5052 aluminum alloy sheet with DLC-coating*. Wear, 2012. 286-287: p. 79-83.
 29. Sato, T. and T. Besshi, *Anti-galling evaluation in aluminum sheet forming*. Journal of Materials Processing Technology, 1998. 83(1): p. 185-191.
 30. Sato, T., et al., *Anti-galling property of a diamond-like carbon coated tool in aluminum sheet forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. 104(1): p. 21-24.
 31. Podgornik, B., S. Hogmark, and O. Sandberg, *Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel*. Surface and Coatings Technology, 2004. 184(2): p. 338-348.
 32. Abe, Y., et al., *Improvement of seizure resistance by roughening surface of stainless steel drawn cup in ironing using die having lubricant pockets*. Production Engineering, 2016. 10(6): p. 551-562.
 33. Kataoka, S., et al., *Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools*. Surface and Coatings Technology, 2004. 177-178: p. 582-590.
 34. Podgornik, B., S. Hogmark, and O. Sandberg, *Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel*. Wear, 2006. 261(1): p. 15-21.
 35. Kim, H., et al., *Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)*. CIRP Annals, 2008. 57(1): p. 299-304.

36. Watcharasresomroeng, B., et al., *Tribological behaviour of thin film coatings against high strength steels*. International Journal of Abrasive Technology, 2009. 2.
37. Sresomroeng, B., et al., *Anti-adhesion performance of various nitride and DLC films against high strength steel in metal forming operation*. Diamond and related materials, 2010. 19(7): p. 833-836.
38. Sresomroeng, B., et al., *Performance of CrN radical nitrided tools on deep drawing of advanced high strength steel*. Surface and Coatings Technology, 2011. 205(17): p. 4198-4204.
39. Choi, H.-S., et al., *Experimental Investigation on Galling Performance of Tool Steel in Stamping of UHSS Sheets*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014. 15: p. 1101-1107.
40. Abe, Y., et al., *Improvement of formability in deep drawing of ultra-high strength steel sheets by coating of die*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214(9): p. 1838-1843.
41. Wang, W., et al., *Influence of surface modification on galling resistance of DC53 tool steel against galvanized advanced high strength steel sheet*. Wear, 2016. 360-361: p. 1-13.
42. Li, G., et al., *Advance on friction of stamping forming*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 96: p. 21-38.
43. Lade, J., et al., *Metallurgical Studies of Austenitic Stainless Steel 304 under Warm Deep Drawing*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014. 21(12): p. 1147-1151.
44. ASTM International, *ASTM G99-95a(2000)e1, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. 2000.
45. Gård, A., et al., *Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets*. Tribology Letters, 2007. 26(1): p. 67-72.
46. Altan, T. and A. Tekkaya, *Sheet Metal Forming: Processes and Applications (Vol. II)*. 2012.

47. Pereira, M., W. Yan, and B. Rolfe, *Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming*. Wear, 2008. 265: p. 1687-1699.
48. Bhushan, B., *Modern tribology handbook*. 2001: Boca Raton, FL : CRC Press.
49. Stachowiak, G. and A. Batchelor, *Engineering Tribology*. Elsevier Butterworth Heinemann. 2005.
50. Steiner, J. and M. Merklein, *Investigation of Influencing Parameters for Tribological Conditions in Dry Forming Processes*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015. 28(12): p. 1435-1441.
51. Haland, P.D., *Experimental design in biotechnology*. Vol. 105. 1989, NY: Marcel Dekker, Inc. 208.
52. Hu, R., *Food Product Design : A Computer-Aided Statistical Approach / R. Hu*. 1999.
53. Kim, H., T. Altan, and Q. Yan, *Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209(8): p. 4122-4133.
54. Altan, T., *Metal forming : fundamental and applications*, ed. S.-I. Oh and H.L. Gegel. 1983: Materials Park, OH : America Society for Metals.
55. Boljanovic, V., *Sheet metal stamping dies: Die design and die-making practice*. Industrial Press Inc, 2013: p. pp.182-183.
56. Devision, M.C., *Standard components for press dies 2007.9 – 2008.8 catalog in Misumi Corporation*. 2008. p. pp.607, 1241-1243.
57. Gård, A. and R. Sarih, *Influence of Tool Material and Surface Roughness on Galling Resistance in Sliding Against Austenitic Stainless Steel*. Tribology Letters, 2012. 46(2): p. 179-185.
58. Hosford, W.F. and R.M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 2007, NY: Cambridge University Press.
59. Li, G., et al., *Advance on friction of stamping forming*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 96(1): p. 21-38.
60. Heinrichs, J., M. Olsson, and S. Jacobson, *Initiation of Galling in Metal Forming:*

Differences Between Aluminium and Austenitic Stainless Steel Studied In Situ in the SEM. Tribology Letters, 2013. 50(3): p. 431-438.

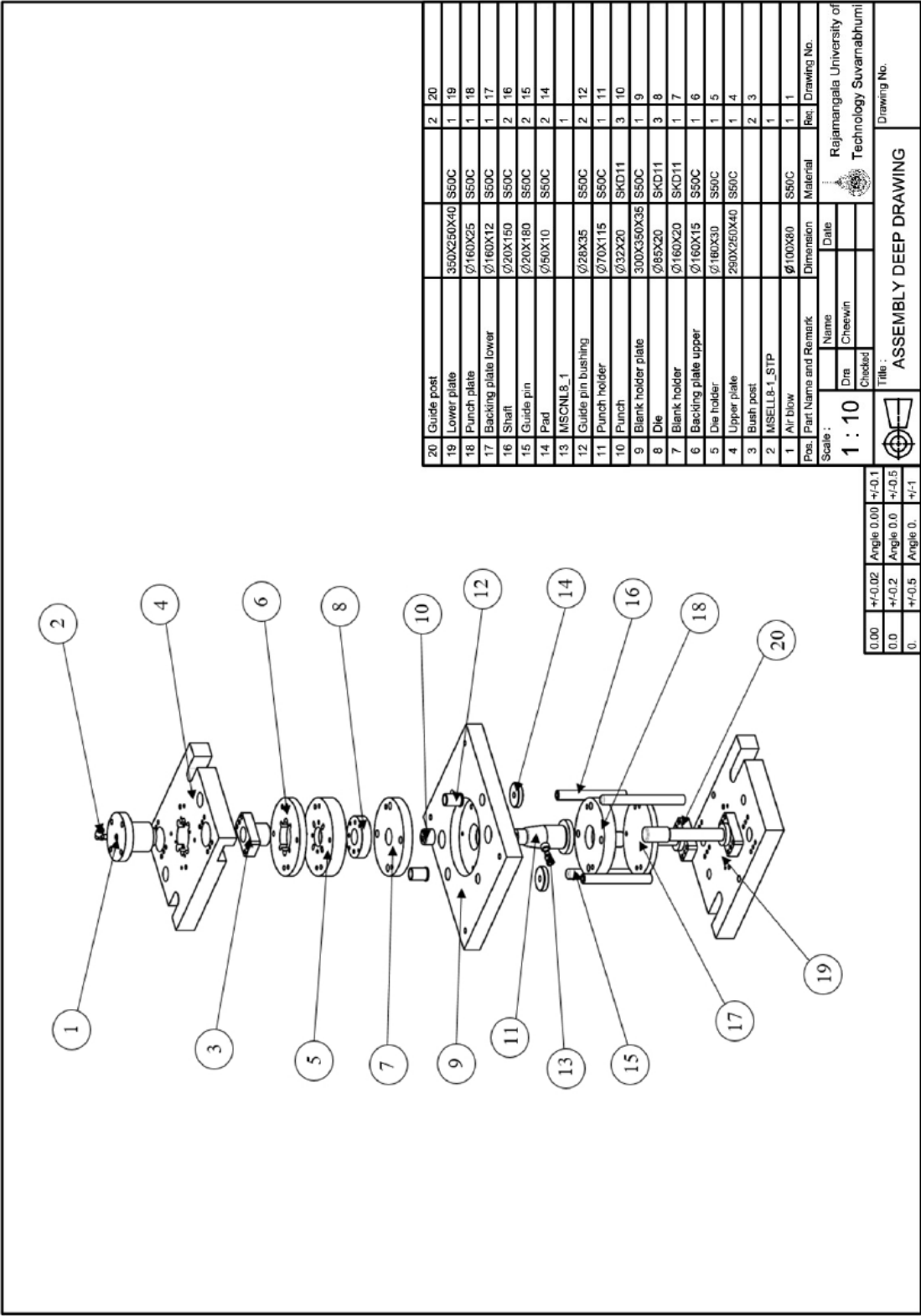
61. Gård, A., P. Krakhmalev, and J. Bergström, *Wear Mechanisms in Galling: Cold Work Tool Materials Sliding Against High-strength Carbon Steel Sheets.* Tribology Letters, 2009. 33(1): p. 45-53.
62. Gård, A., *Influence of tool microstructure on galling resistance.* Tribology international, 2013. 57: p. 251-256.
63. Karlsson, P., et al., *Influence of work material proof stress and tool steel microstructure on galling initiation and critical contact pressure.* Tribology international, 2013. 60: p. 104-110.
64. Berthier, Y., *Wear-materials mechanisms and practice.* Third-body Reality-Consequences and Use of the Third-body Concept to Solve Friction and Wear Problems, 2005: p. 291-316.
65. พงศราญ ไกรดำ. การศึกษาอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมต่อสมบัติทางไตรบอโลยี (Tribology) ของฟิล์มเคลือบแข็ง. 2560, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: กรุงเทพฯ.

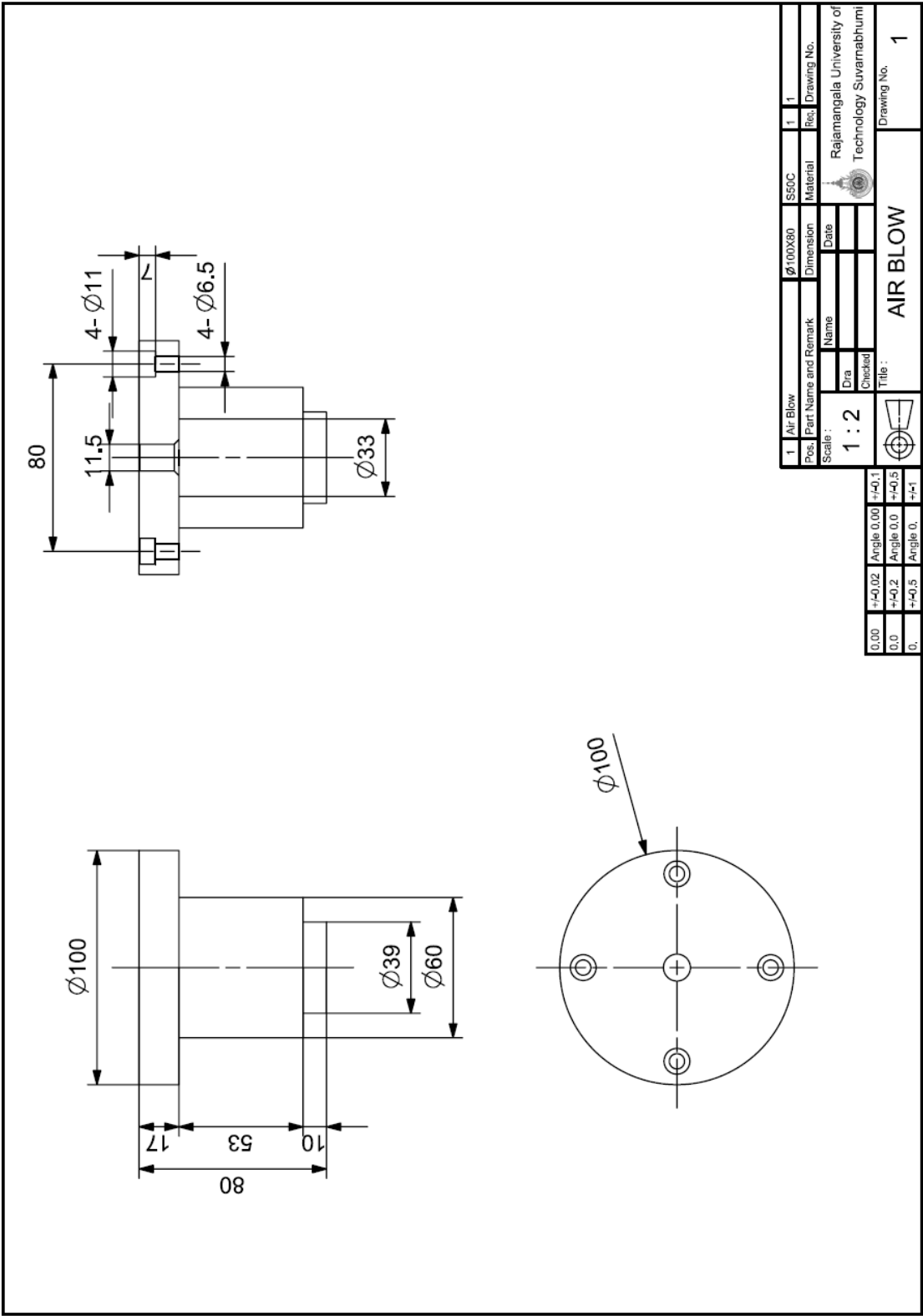


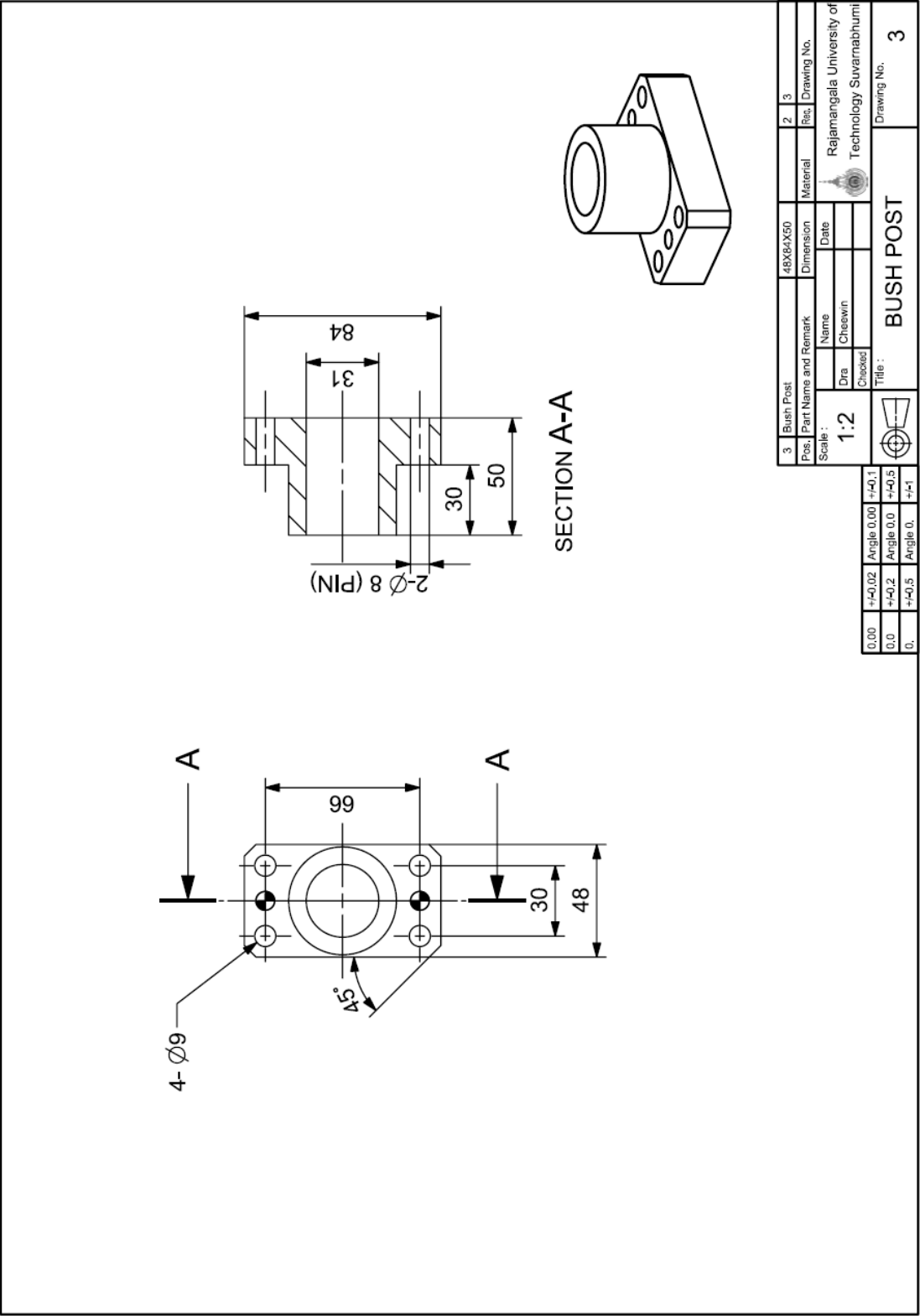
ภาคผนวก

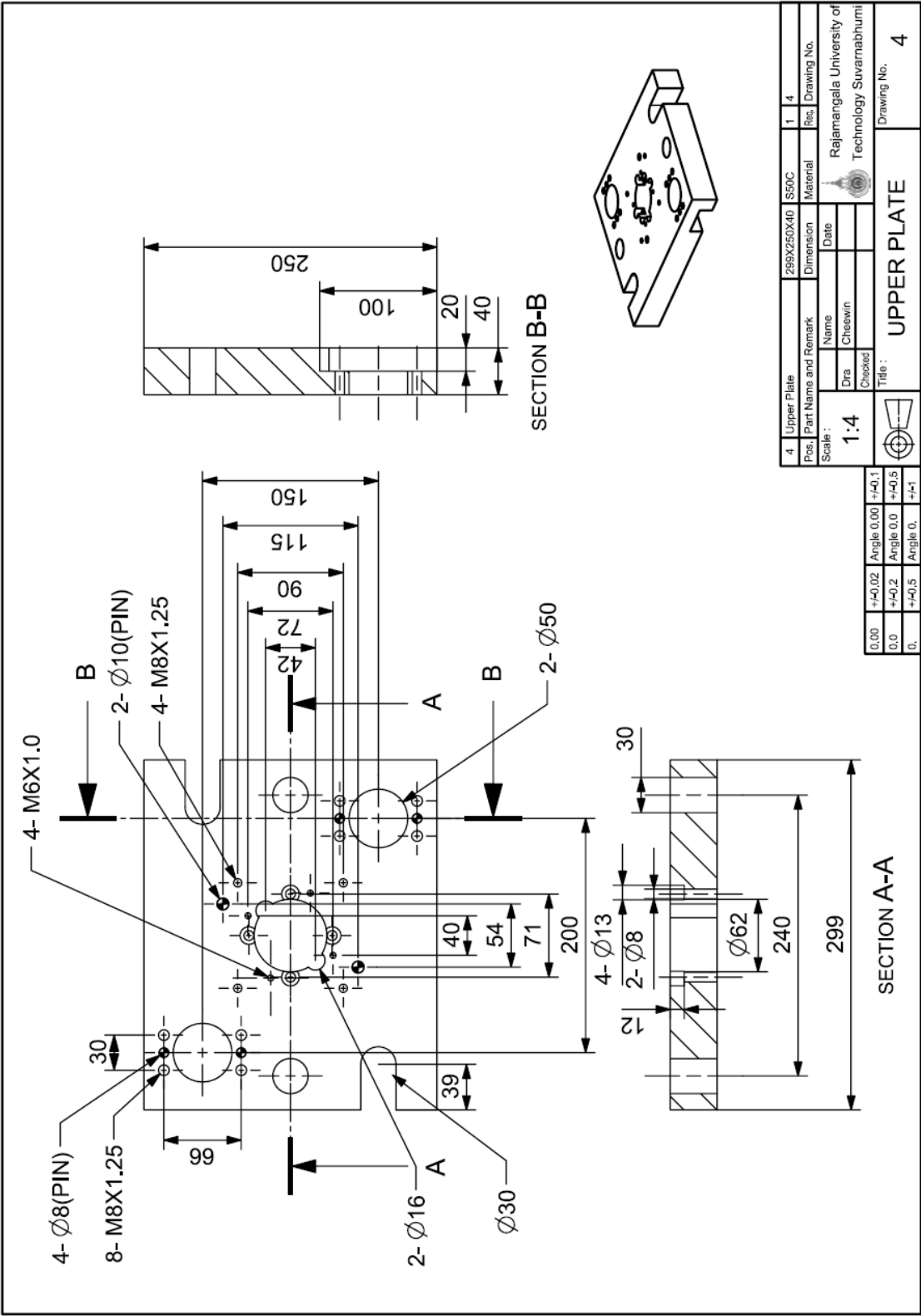


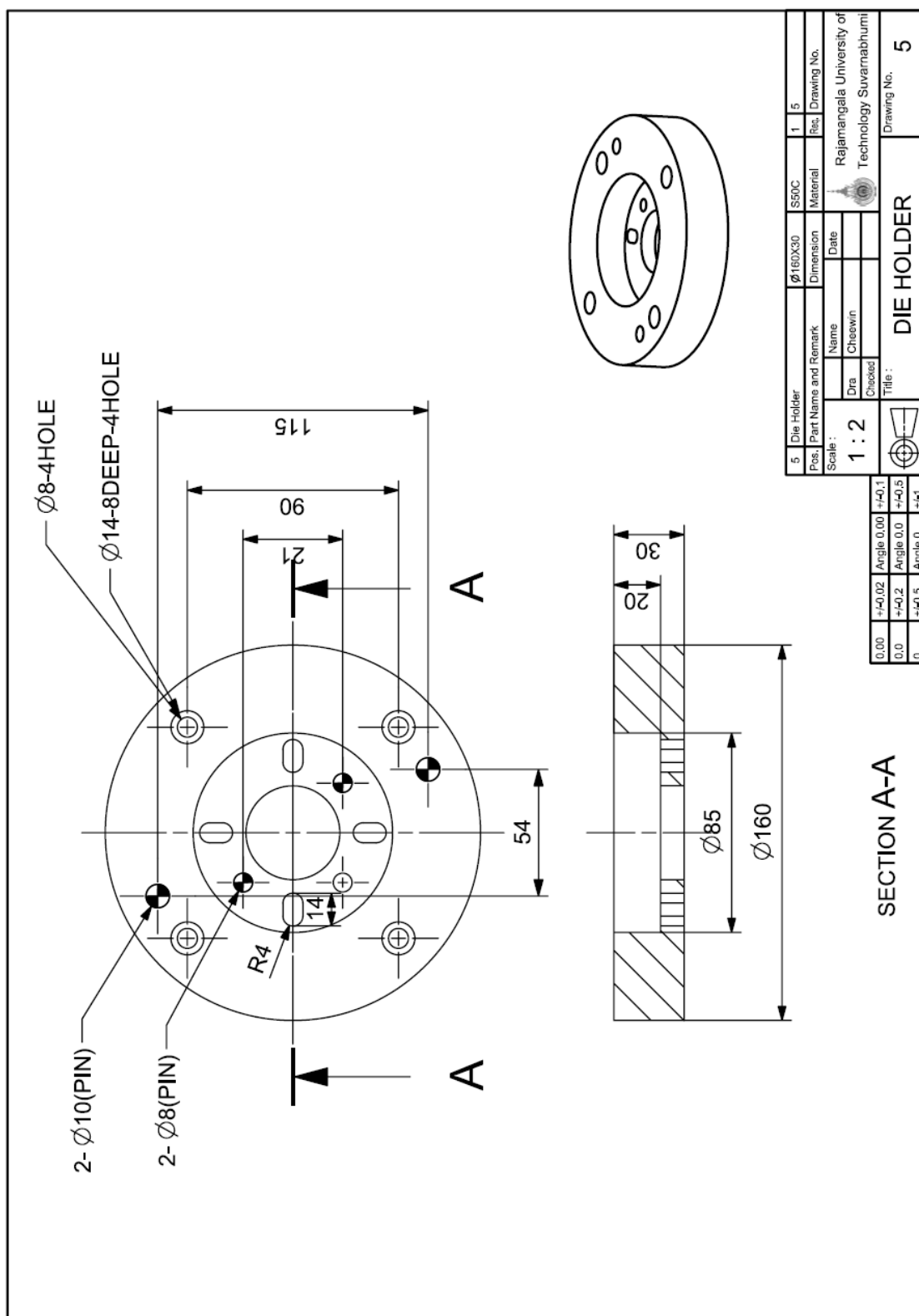
ภาคผนวก ก
แบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

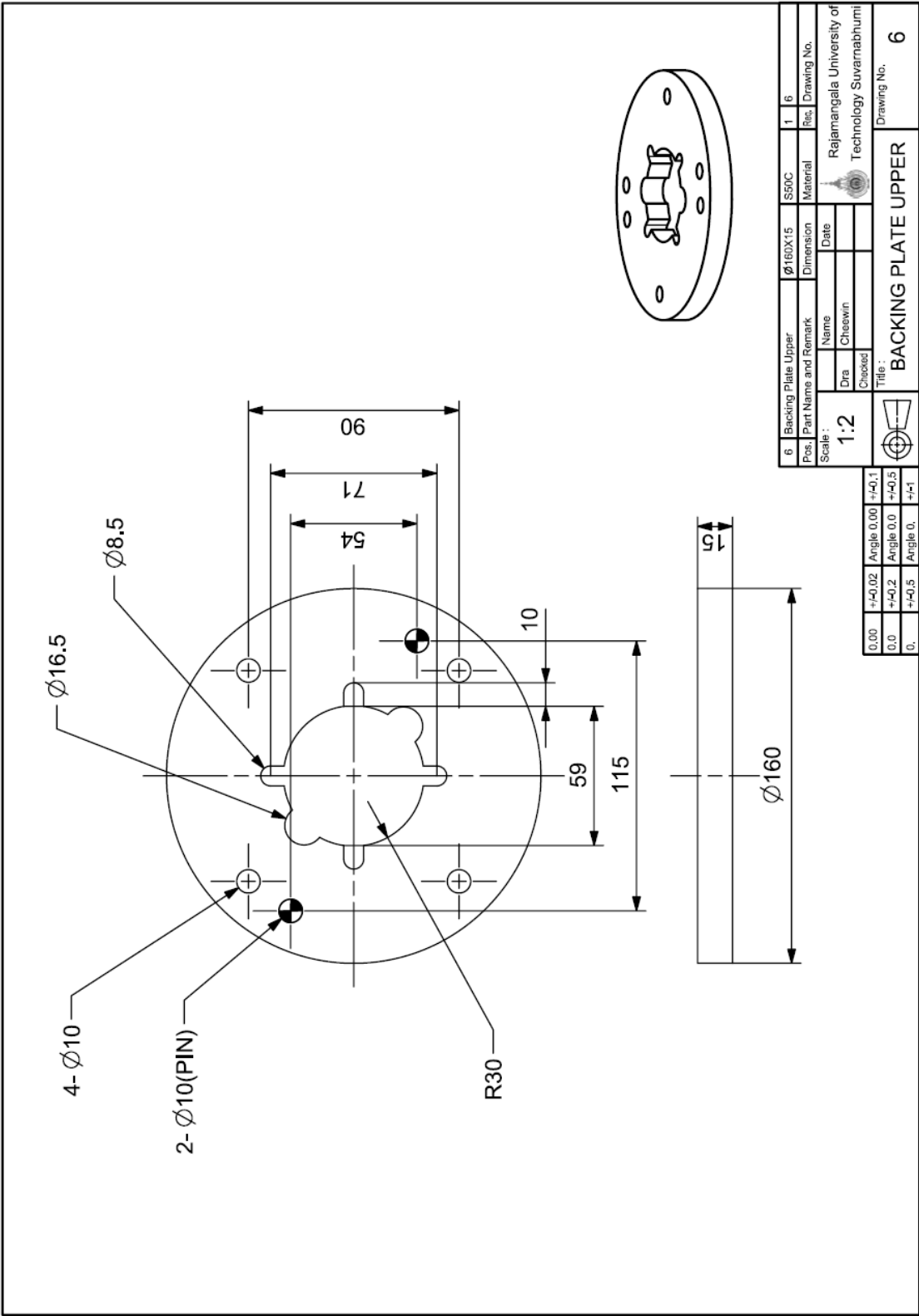


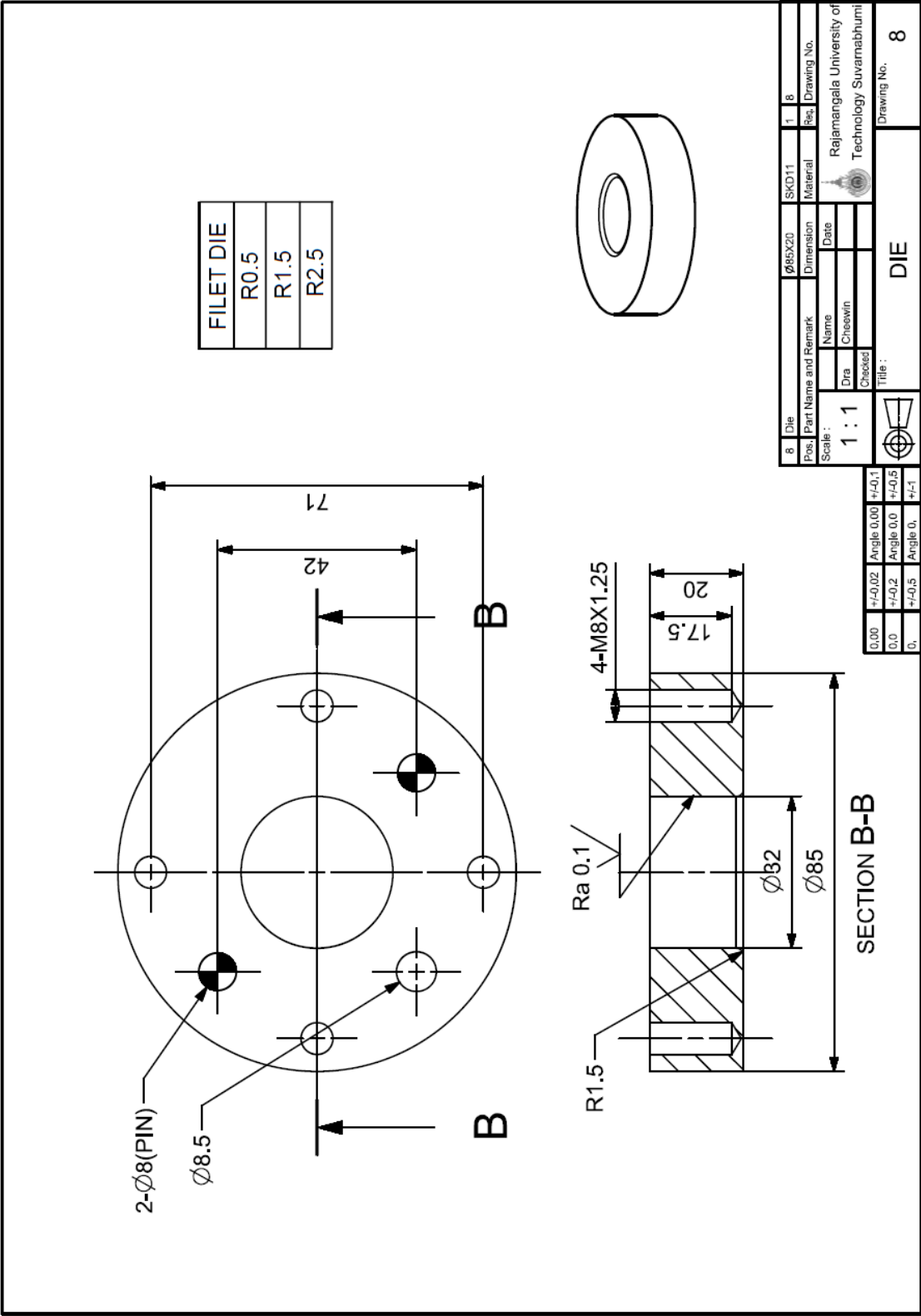


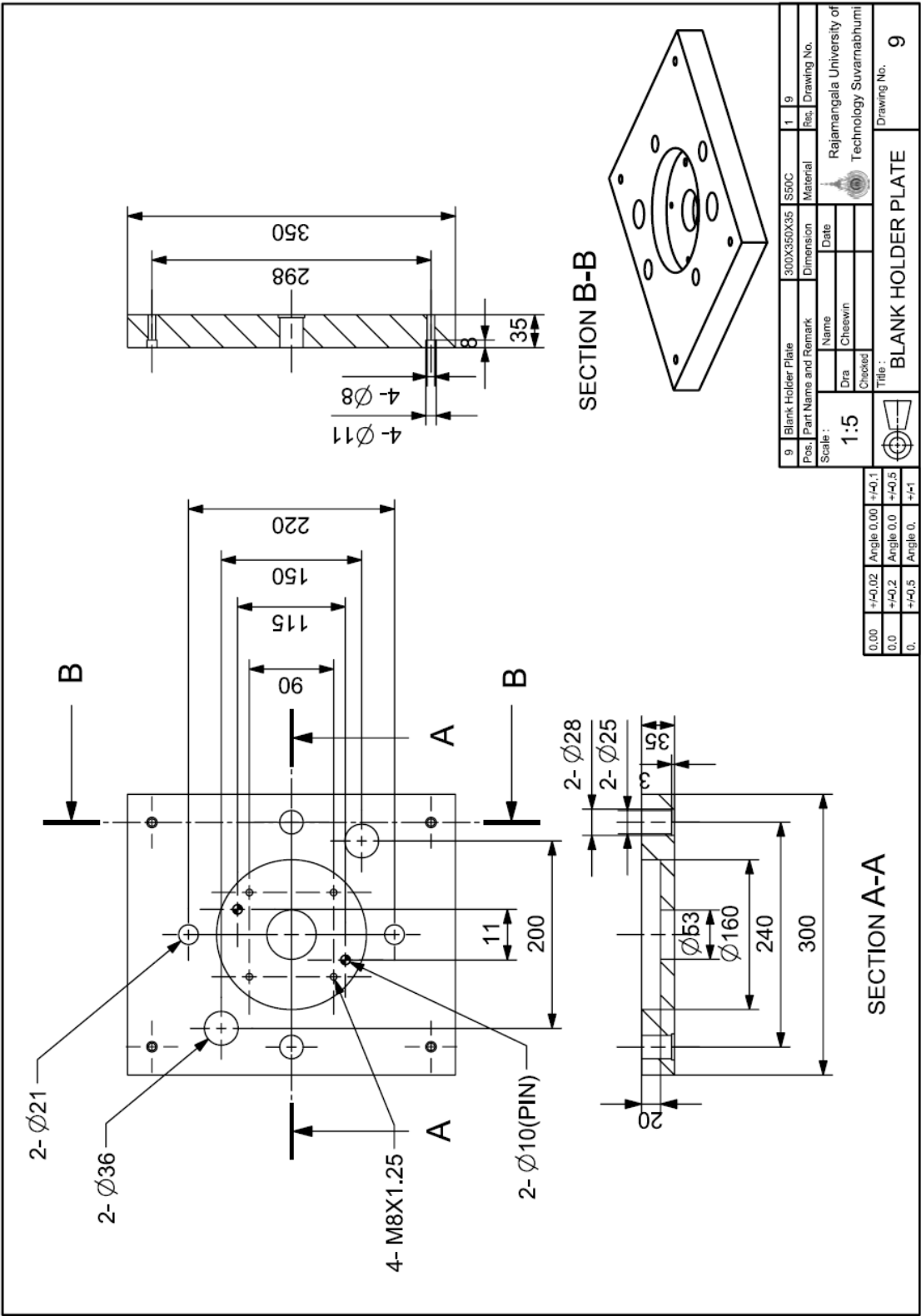


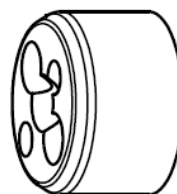
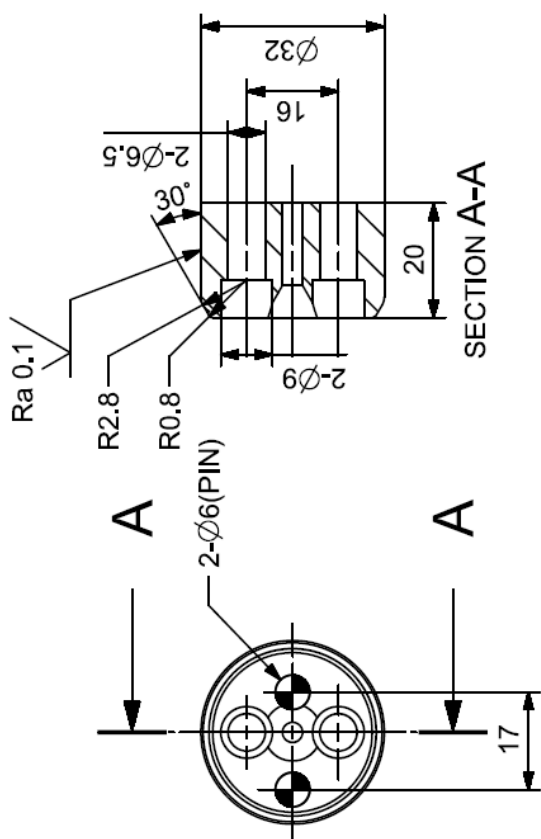






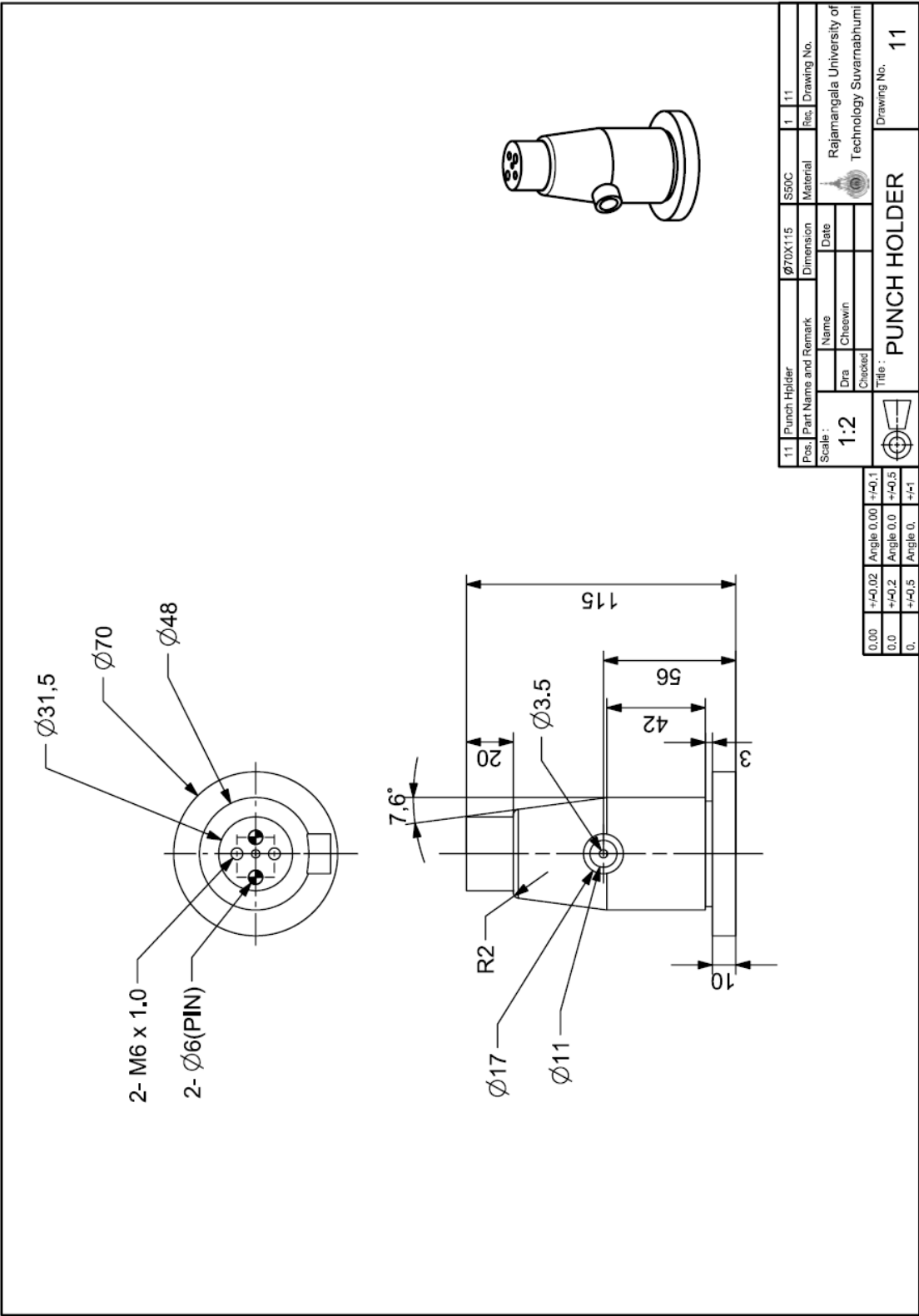


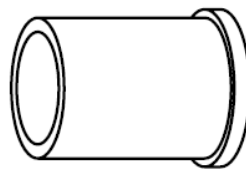
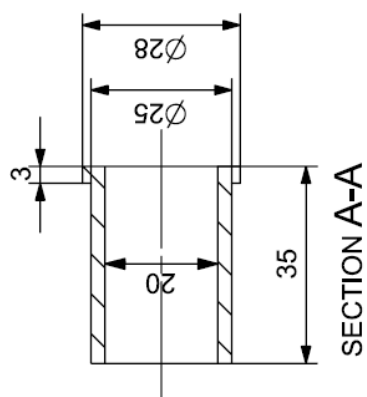
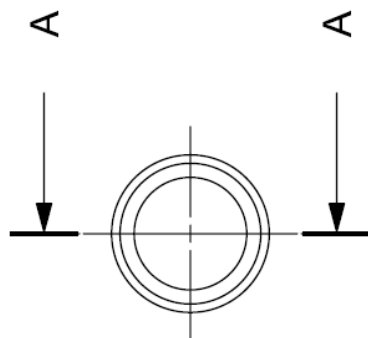




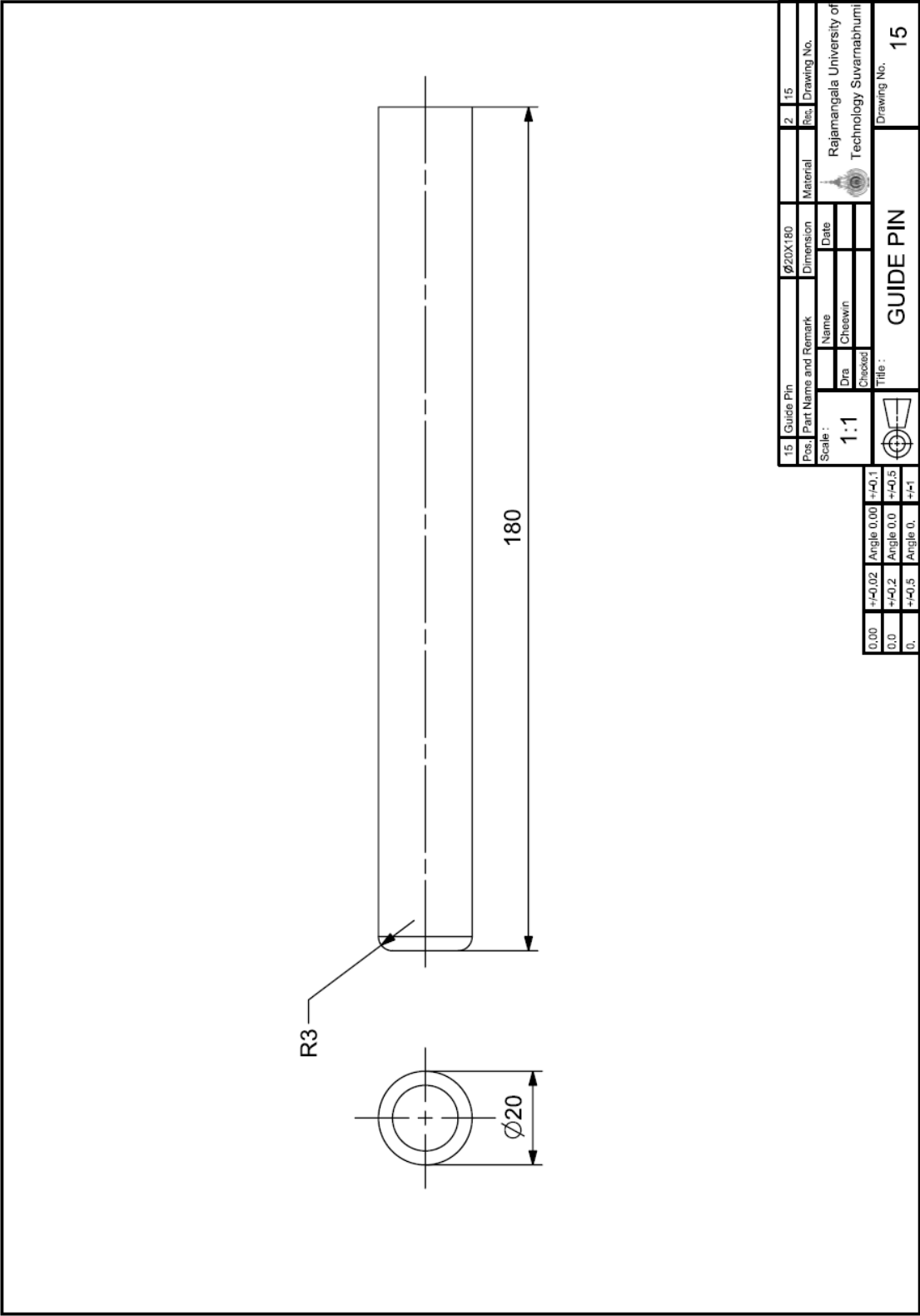
ANGLE PUNCH
0
15
30

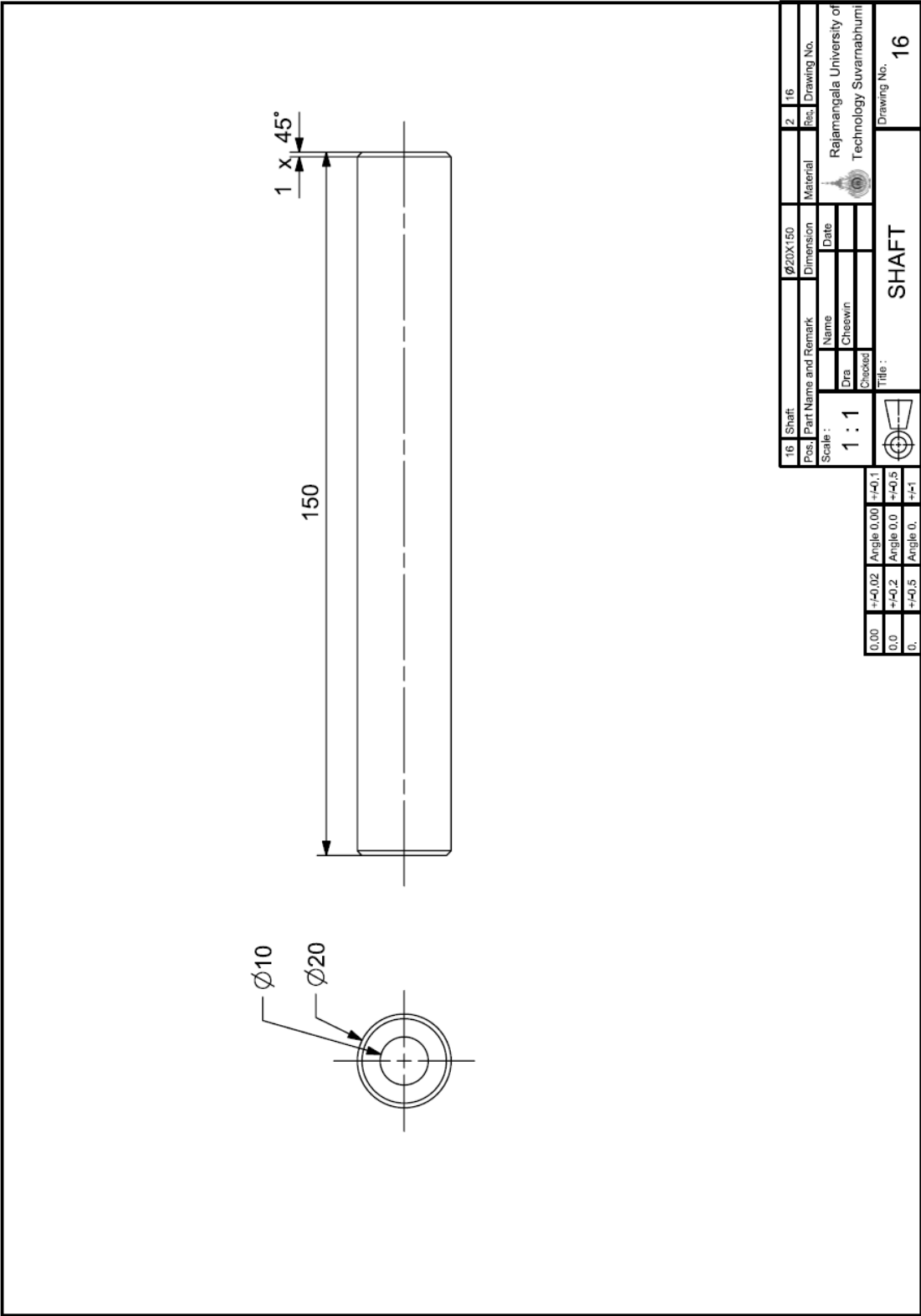
[illegible]

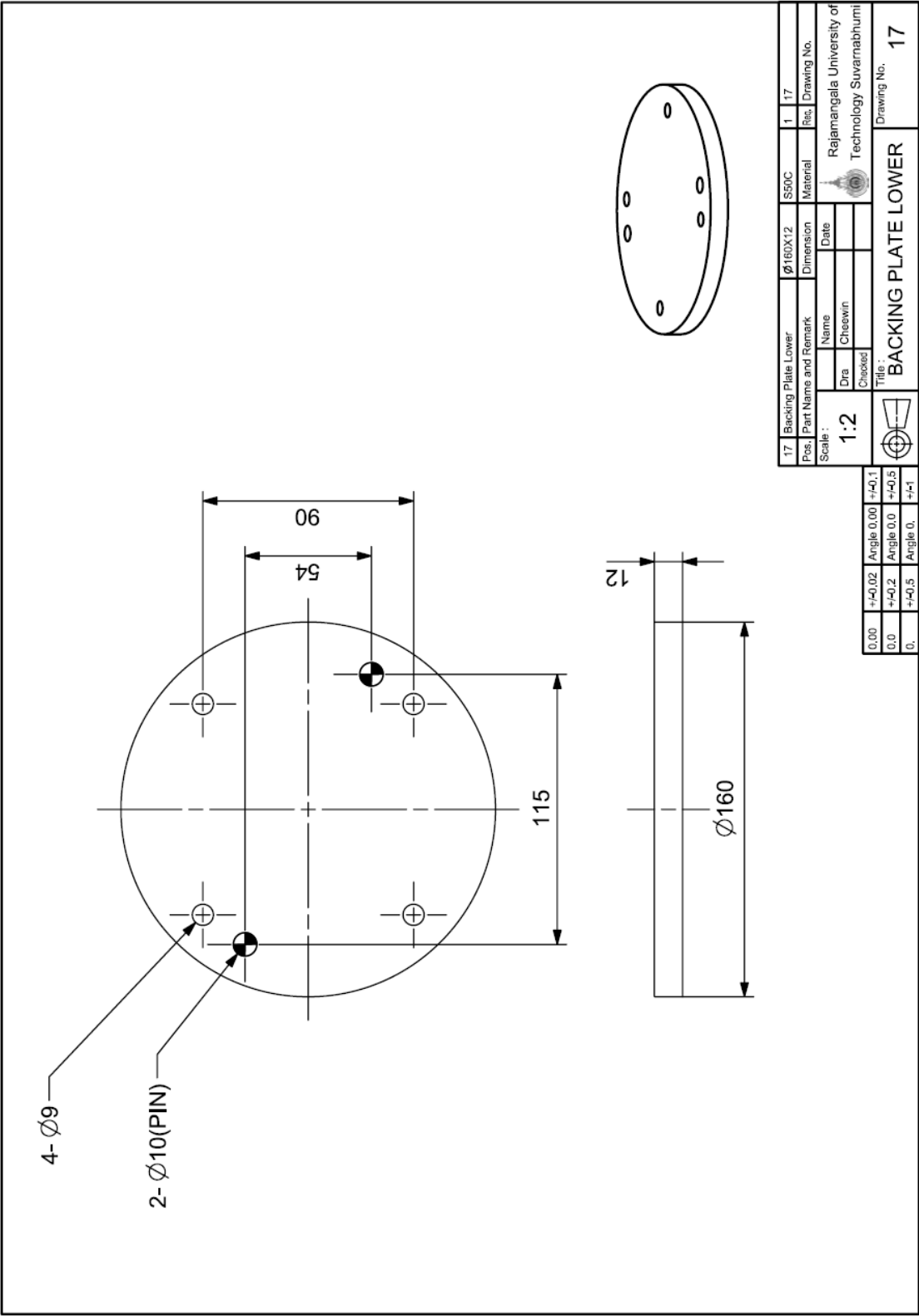


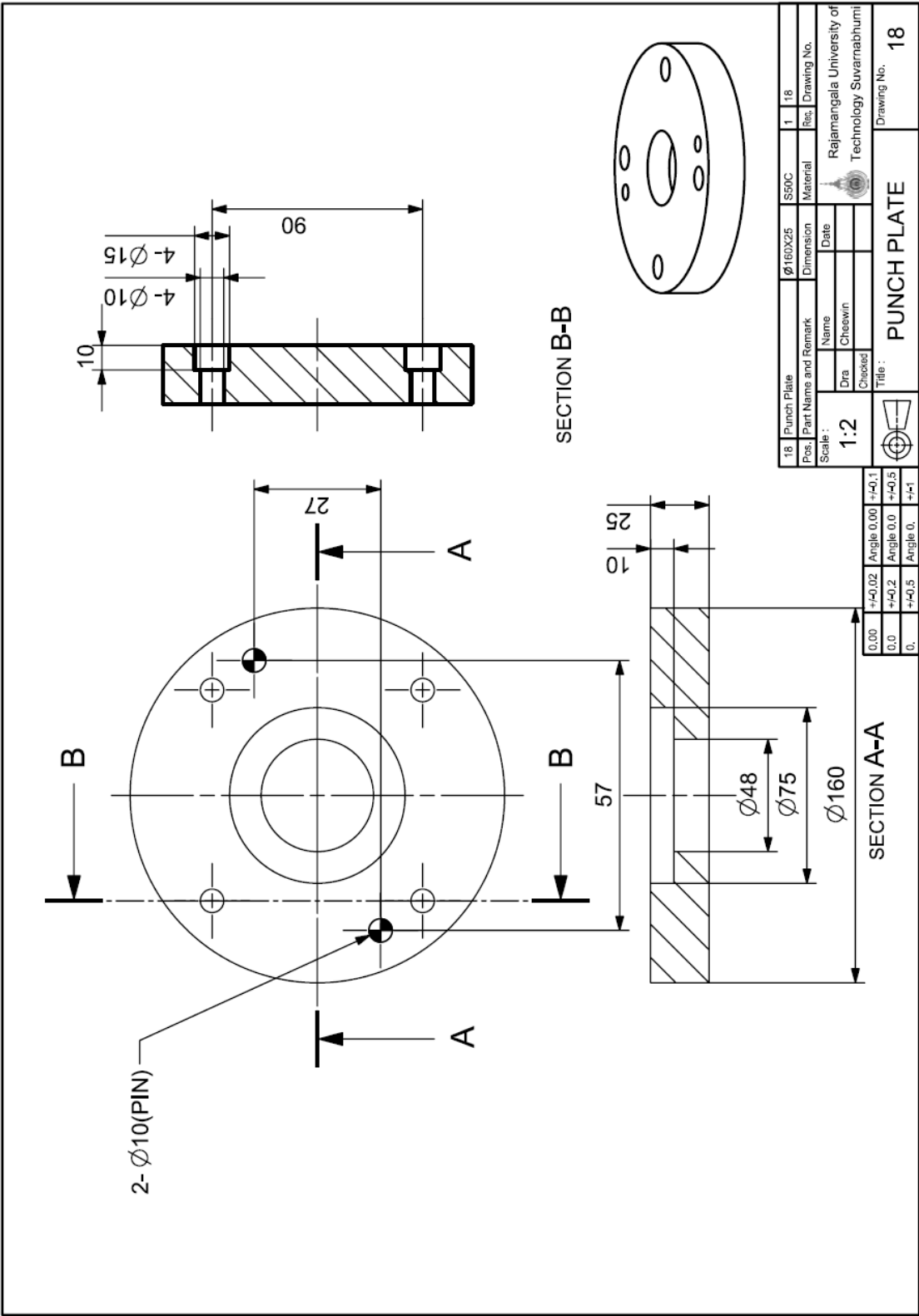


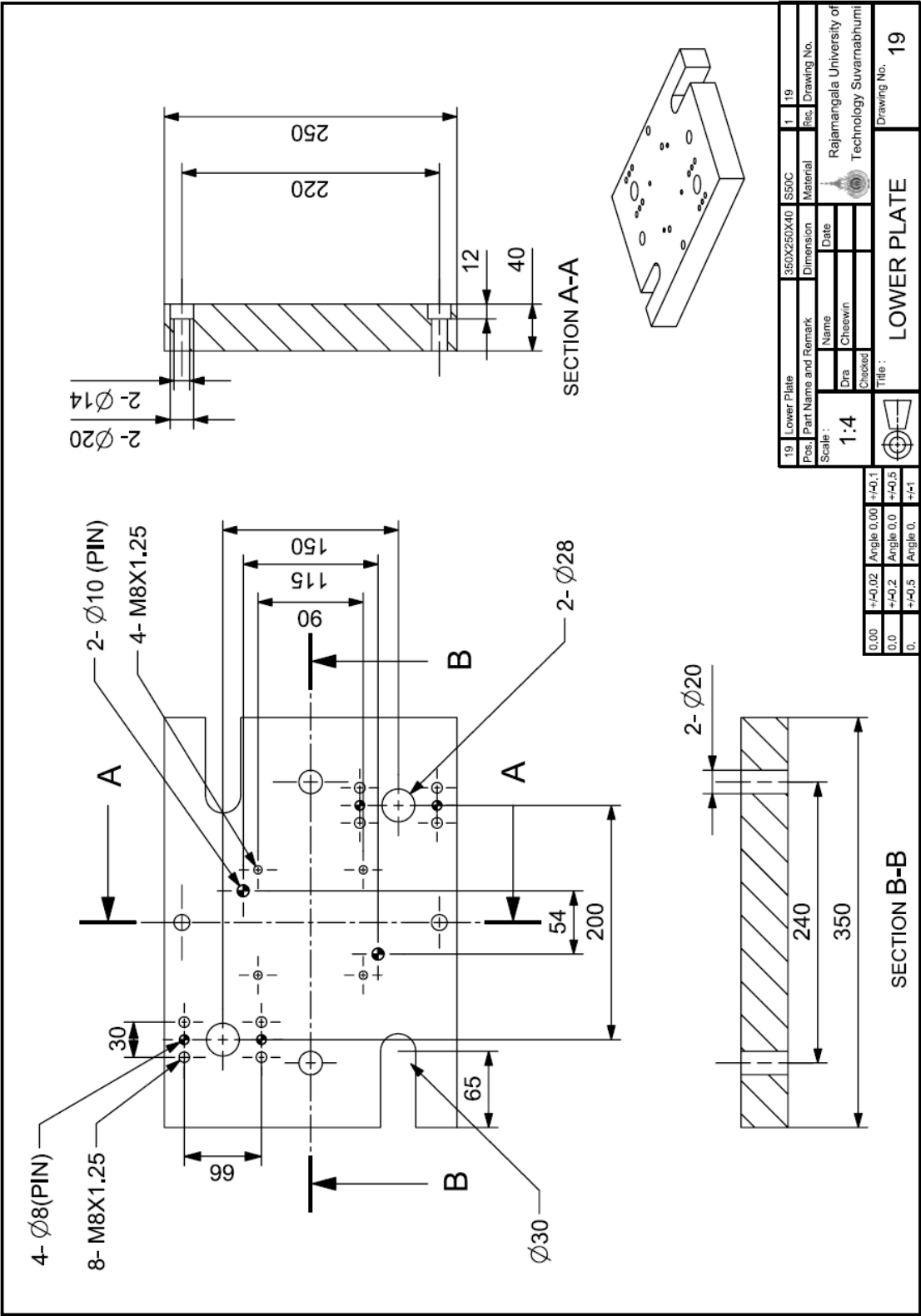
12	Guide Pin Bushing	Ø28X35	2	12
Pos., Part Name and Remark	Dimension	Material	Qty.	Drawing No.
Scale : 1 : 1 Drawn Checked Date  Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi				
		Title : GUIDE PIN BUSHING Drawing No. 12		

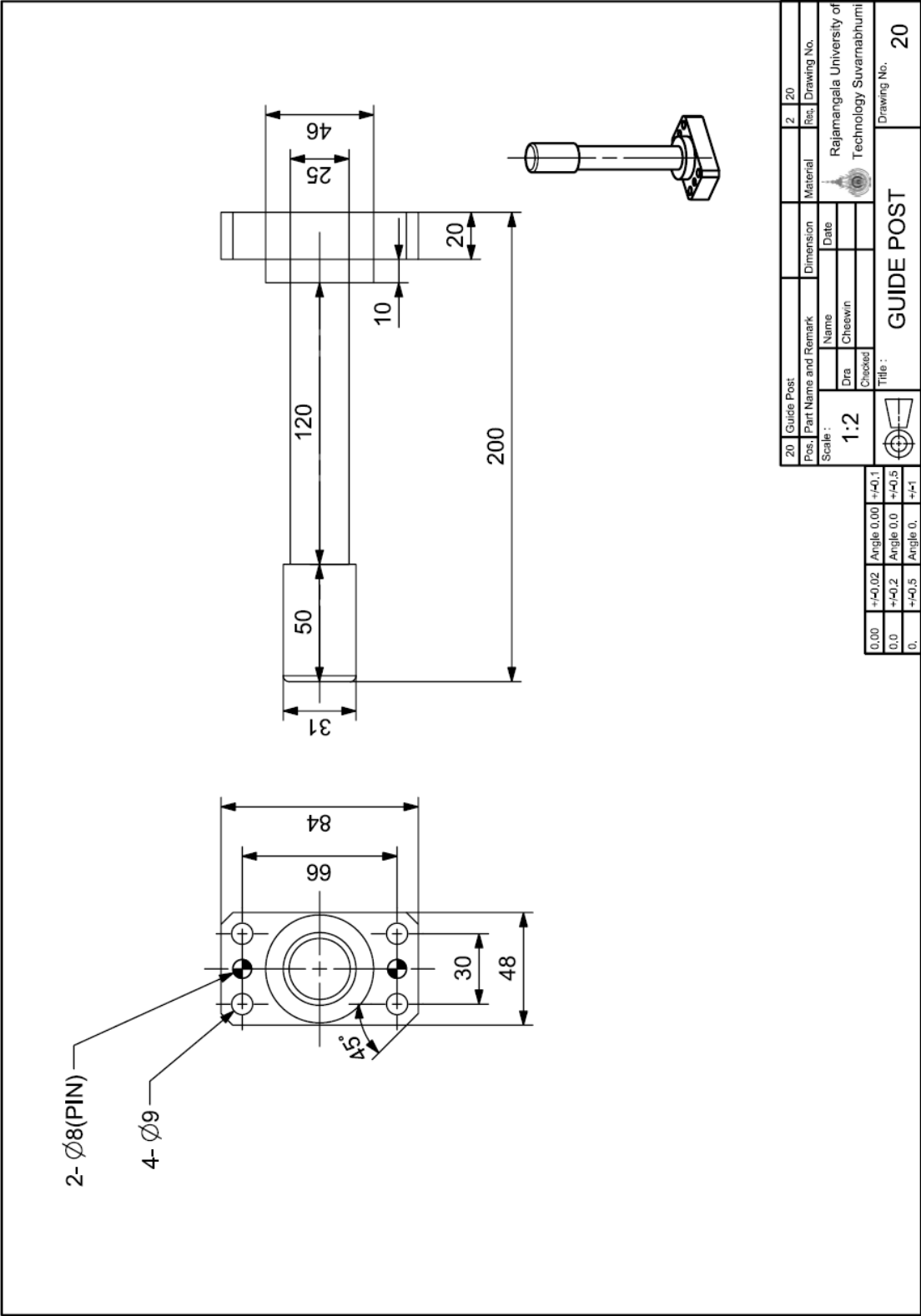














ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบวัสดุชิ้นงานด้วยแรงดึง

การทดสอบแรงดึงทำโดยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8 [11] โดยเตรียมชิ้นทดสอบที่มีความยาวในลักษณะตามทิศทางการรีด (0°) 45 องศา กับทิศทางการรีด (45°) และ 90° องศา กับทิศทางการรีด (90°) ทำการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อเงื่อนไขการทดสอบ ค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงดังตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ด้วยแรงดึง

Orientation with roll direction	Elastic modulus [GPa]	Yield strength [MPa]	Ultimate tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Strength Coefficient; K [MPa]	Strain Hardening Exponent; n	r -value
0°	209.914	270.780	738.380	52.4	1430.21	0.4543	0.84952
0°	206.088	270.320	734.260	53.9	1423.97	0.4520	0.87641
0°	218.427	269.320	718.930	63.8	1465.21	0.4333	0.90940
Average	211.476	270.140	730.523	56.7	1439.80	0.4465	0.8784
45°	214.086	266.830	678.960	70.3	1313.41	0.4132	1.13574
45°	207.115	264.050	697.320	73.5	1319.17	0.4121	1.15692
45°	208.878	261.910	683.040	71.3	1319.78	0.4148	1.16596
Average	210.026	264.263	686.440	71.7	1317.45	0.4134	1.1529
90°	220.325	269.500	720.000	57.9	1217.87	0.4188	0.84965
90°	211.422	265.750	711.130	58.7	1206.70	0.4157	0.81145
90°	208.368	268.820	719.190	58.3	1206.70	0.4157	0.82953
Average	213.372	268.023	716.773	58.3	1210.42	0.4167	0.8302
Average (0° , 45° , 90°)	211.625	267.476	711.246	62.2	1322.55	0.4255	0.9538

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมี



ศูนย์ทดสอบ

หน้า 2 / 4

เอกสารแนบ 1 : ผลทดสอบส่วนประกอบทางเคมี

เลขที่ สลท/ศท 1341/2563 18 กุมภาพันธ์ 2563

หมายเลขคำขอรับบริการ : 631156

วันที่ทดสอบ : 18 กุมภาพันธ์ 2563

สถานที่ทดสอบ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ห้อง 104

ชื่อผู้ขอรับบริการ : ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รายละเอียด/สภาพตัวอย่าง : SUS304BA และ DC53

หมายเลขปฏิบัติการ : TC 6307241-6307242

สภาพแวดล้อมขณะทดสอบ : อุณหภูมิ 22.6 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 43 %RH

เครื่องทดสอบ : Spectrolab Model : Lavm12, Type : 76004140, S/N : 16002150

หน่วย : ร้อยละ

ชื่อตัวอย่าง	SUS304BA	DC53
ธาตุ	ผล	ผล
C	0.0342	1.4346
Si	0.5467	0.2285
Mn	1.0501	0.2869
P	0.0361	0.0337
S	0.0082	0.0028
Cr	18.4744	11.6004
Mo	0.1023	0.8489
Ni	8.2941	0.4832
Al	0.0033	0.0067
Cu	0.1417	0.1656
Nb	<0.0002	-
Ti	0.0017	-
V	0.0830	0.2421
B	<0.0001	-

- รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบ และการแปลผลการทดสอบเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น
- สถาบันเหล็กฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไขเพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันเหล็กฯ

ภาพประกอบ ค.1 ผลการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมี

เอกสารแนบ 2 : ผลทดสอบโครงสร้างจุลภาค

เลขที่ สลท/ศท 1341/2563

18 กุมภาพันธ์ 2563

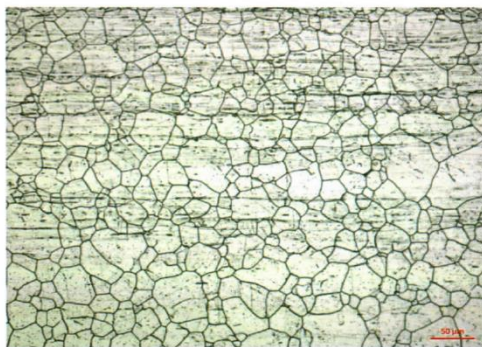
หมายเลขคำขอรับบริการ : 631156

วันที่ทดสอบ : 5 กุมภาพันธ์ 2563

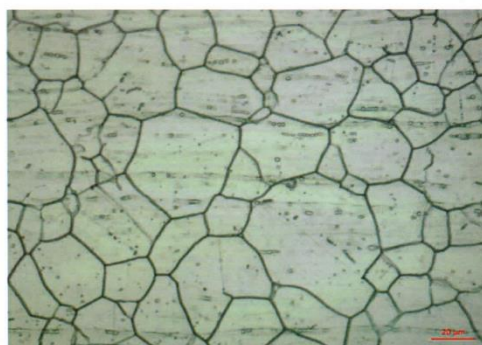
สถานที่ทดสอบ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ห้อง 102

ชื่อผู้ขอรับบริการ : ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รายละเอียด/สภาพตัวอย่าง : SUS304BA



รูปที่ 1-1 : โครงสร้างจุลภาค กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 1-2 : โครงสร้างจุลภาค กำลังขยาย 500 เท่า

1. รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ/วิเคราะห์ และการแปลผลเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น
2. สถาบันเหล็กฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไขเพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันเหล็กฯ

เอกสารแนบ 2 : ผลทดสอบโครงสร้างจุลภาค (ต่อ)

เลขที่ สลท/ศท 1341/2563

18 กุมภาพันธ์ 2563

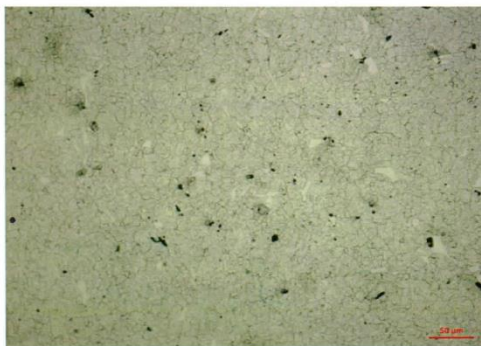
หมายเลขคำขอรับบริการ : 631156

วันที่ทดสอบ : 5 กุมภาพันธ์ 2563

สถานที่ทดสอบ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ห้อง 102

ชื่อผู้ขอรับบริการ : ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รายละเอียด/สภาพตัวอย่าง : DC53



รูปที่ 2-1 : โครงสร้างจุลภาค กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 2-2 : โครงสร้างจุลภาค กำลังขยาย 500 เท่า

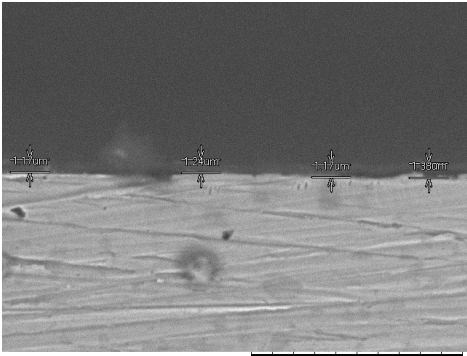
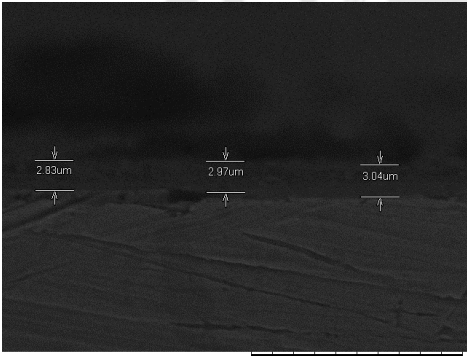
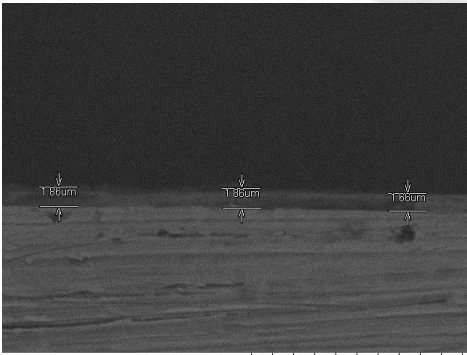
1. รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ/วิเคราะห์ และการแปลผลเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น
2. สถาบันเหล็กไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันเหล็กฯ



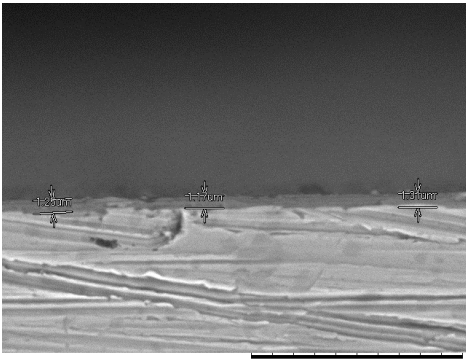
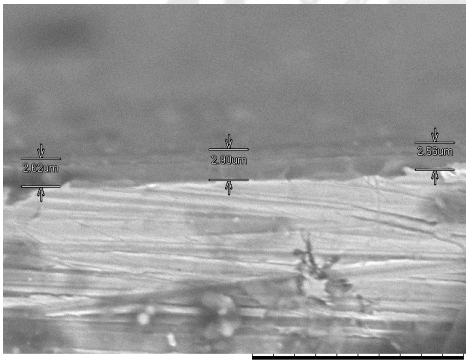
ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบสมรรถนะทางกายภาพและทางกลของฟิล์มแข็ง

ตาราง ง.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มที่ศึกษา

ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่ศึกษา	รายการ	ผลการตรวจสอบ			
		1	2	3	เฉลี่ย
ฟิล์ม DLC 	ความหนาฟิล์ม [μm]	1.17	1.24	1.17	1.20
	ความหยาบผิว Ra [μm]	0.077	0.079	0.080	0.079
	ความแข็ง [HV]	2993 $\pm$ 169			
ฟิล์ม CrN 	ความหนาฟิล์ม [μm]	2.83	2.97	3.04	2.95
	ความหยาบผิว Ra [μm]	0.109	0.104	0.091	0.101
	ความแข็ง [HV]	1646 $\pm$ 69			
ฟิล์ม TiN 	ความหนาฟิล์ม [μm]	1.86	1.86	1.66	1.79
	ความหยาบผิว Ra [μm]	0.101	0.080	0.092	0.091
	ความแข็ง [HV]	2157 $\pm$ 78			

ตาราง ง.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของฟิล์มที่ศึกษา (ต่อ)

ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่ศึกษา	รายการ	ผลการตรวจสอบ			
		1	2	3	เฉลี่ย
ฟิล์ม TiCN 	ความหนาฟิล์ม [μm]	1.25	1.17	1.31	1.24
	ความหยาบผิว Ra [μm]	0.133	0.140	0.154	0.142
	ความแข็ง [HV]	2765 $\pm$ 144			
ฟิล์ม TiAlN 	ความหนาฟิล์ม [μm]	2.62	2.90	2.56	2.69
	ความหยาบผิว Ra [μm]	0.113	0.109	0.095	0.106
	ความแข็ง [HV]	2762 $\pm$ 156			



ตาราง จ.1 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.791	0.572	0.044
		100	0.000	0.817	0.560	0.097
		150	0.000	0.796	0.597	0.106
5	1095	50	0.000	0.885	0.565	0.141
		100	0.000	1.402	0.557	0.172
		150	0.000	0.744	0.742	0.118
8	1280	50	0.000	0.868	0.712	0.117
		100	0.000	0.844	0.765	0.069
		150	0.000	0.869	0.779	0.048

ตาราง จ.2 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งเคลือบฟิล์ม DLC กับเหล็กกล้าไร้
สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.187	0.073	0.008
		100	0.000	0.204	0.091	0.007
		150	0.000	0.126	0.112	0.011
5	1095	50	0.000	0.179	0.111	0.004
		100	0.000	0.183	0.118	0.005
		150	0.000	0.176	0.117	0.010
8	1280	50	0.000	0.129	0.047	0.007
		100	0.000	0.096	0.088	0.006
		150	0.000	0.120	0.113	0.008

ตาราง จ.3 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งเคลือบฟิล์ม CrN กับเหล็กกล้าไร้
สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.958	0.764	0.087
		100	0.000	0.854	0.712	0.088
		150	0.000	0.851	0.690	0.115
5	1095	50	0.000	0.796	0.651	0.056
		100	0.000	0.909	0.711	0.113
		150	0.000	0.832	0.752	0.093
8	1280	50	0.000	0.849	0.714	0.131
		100	0.000	0.850	0.733	0.125
		150	0.000	0.832	0.728	0.092

ตาราง จ.4 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งเคลือบฟิล์ม TiN กับเหล็กกล้าไร้
สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.931	0.779	0.094
		100	0.000	0.913	0.782	0.110
		150	0.000	0.920	0.798	0.119
5	1095	50	0.000	0.796	0.681	0.033
		100	0.000	0.872	0.780	0.129
		150	0.000	0.904	0.802	0.155
8	1280	50	0.000	0.749	0.590	0.068
		100	0.000	0.900	0.643	0.133
		150	0.000	0.689	0.572	0.069

ตาราง จ.5 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งเคลือบฟิล์ม TiCN กับเหล็กกล้าไร้
สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.925	0.769	0.086
		100	0.000	0.964	0.844	0.121
		150	0.000	0.935	0.870	0.121
5	1095	50	0.000	0.747	0.615	0.113
		100	0.000	0.877	0.779	0.106
		150	0.000	0.878	0.710	0.105
8	1280	50	0.000	0.821	0.711	0.115
		100	0.000	0.810	0.665	0.097
		150	0.000	0.846	0.696	0.095

ตาราง จ.6 ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน
ระหว่างผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ชุบแข็งเคลือบฟิล์ม TiAlN กับเหล็กกล้าไร้
สนิม SUS304 BA

Normal load [N]	Contact pressure [MPa]	Sliding velocity [mm/s]	Friction coefficient			
			Min.	Max.	Mean	STDV.
2	807	50	0.000	0.917	0.769	0.086
		100	0.000	0.906	0.793	0.094
		150	0.000	1.036	0.880	0.119
5	1095	50	0.000	0.776	0.619	0.114
		100	0.000	0.903	0.695	0.131
		150	0.000	0.731	0.589	0.057
8	1280	50	0.000	0.850	0.698	0.124
		100	0.000	0.802	0.560	0.104
		150	0.000	0.830	0.610	0.138

ตาราง จ.7 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.6950	0.7093	0.6967	0.6954	0.7036	0.7000	0.0063
200	0.8896	0.8899	0.8870	0.8919	0.8936	0.8904	0.0025
300	1.0019	1.0097	1.0038	1.0003	1.0044	1.0040	0.0036
400	1.0841	1.0806	1.0782	1.0723	1.0728	1.0776	0.0051
500	1.1479	1.1481	1.1481	1.1383	1.3248	1.1814	0.0803
600	1.2139	1.2138	1.2162	1.2142	1.2216	1.2159	0.0033
700	1.2709	1.2712	1.2745	1.2854	1.2859	1.2776	0.0075
800	1.3172	1.3139	1.3198	1.3077	1.3273	1.3172	0.0072
900	1.3563	1.3457	1.3557	1.3605	1.3431	1.3523	0.0075
1000	1.3958	1.3961	1.3977	1.3805	1.3800	1.3900	0.0089
1100	1.4348	1.4247	1.4340	1.4332	1.4318	1.4317	0.0041
1200	1.4603	1.4666	1.4610	1.4590	1.4676	1.4629	0.0039

ตาราง จ.8 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.7720	0.7631	0.7607	0.7764	0.7909	0.7726	0.0121
200	0.9193	0.9340	0.9389	0.9186	0.9397	0.9301	0.0104
300	1.0431	1.0287	1.0245	1.0421	1.0289	1.0335	0.0085
400	1.1222	1.1270	1.0907	1.1277	1.1179	1.1171	0.0153
500	1.1469	1.1777	1.1778	1.1509	1.1636	1.1634	0.0145
600	1.2462	1.2157	1.2481	1.2315	1.2378	1.2359	0.0131
700	1.2912	1.2913	1.2826	1.2932	1.2911	1.2899	0.0042
800	1.2923	1.3152	1.3018	1.3151	1.3342	1.3117	0.0158
900	1.3254	1.3515	1.3541	1.3774	1.3657	1.3548	0.0194
1000	1.3897	1.3949	1.3675	1.3888	1.3945	1.3871	0.0113
1100	1.4215	1.4222	1.4567	1.4125	1.4100	1.4246	0.0187
1200	1.4621	1.4475	1.4679	1.4685	1.4755	1.4643	0.0105

ตาราง จ.9 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.6763	0.6777	0.6553	0.6850	0.6520	0.6693	0.0147
200	0.8131	0.8143	0.8056	0.7978	0.8231	0.8108	0.0096
300	0.9060	0.9333	0.9312	0.9127	0.9070	0.9180	0.0132
400	1.0164	1.0180	0.9823	0.9989	1.0159	1.0063	0.0155
500	1.0636	1.0679	1.0452	1.0772	1.0746	1.0657	0.0127
600	1.1475	1.1359	1.1361	1.1356	1.1348	1.1380	0.0053
700	1.1466	1.1599	1.1443	1.1549	1.1570	1.1525	0.0068
800	1.1719	1.2107	1.1701	1.1718	1.1634	1.1776	0.0188
900	1.2239	1.2392	1.2217	1.2393	1.2037	1.2256	0.0148
1000	1.2402	1.2561	1.2488	1.2563	1.2311	1.2465	0.0108
1100	1.2550	1.2567	1.2416	1.2551	1.2356	1.2488	0.0096
1200	1.2566	1.2640	1.2600	1.2680	1.2756	1.2648	0.0074

ตาราง จ.10 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.9090	0.9137	0.9199	0.9465	0.9198	0.9218	0.0146
200	1.0693	1.0755	1.0795	1.1028	1.0873	1.0829	0.0129
300	1.1551	1.1436	1.1462	1.1452	1.1423	1.1465	0.0050
400	1.2181	1.2412	1.2301	1.2363	1.2438	1.2339	0.0103
500	1.3057	1.3152	1.2799	1.3030	1.3066	1.3021	0.0132
600	1.3466	1.3363	1.3357	1.3344	1.3318	1.3370	0.0057
700	1.3548	1.3445	1.3481	1.3552	1.3544	1.3514	0.0048
800	1.3745	1.3783	1.3761	1.3980	1.3929	1.3840	0.0107
900	1.4284	1.4197	1.4161	1.4186	1.4087	1.4183	0.0071
1000	1.4840	1.4851	1.4887	1.4820	1.4928	1.4865	0.0043
1100	1.5300	1.5420	1.5403	1.5390	1.5374	1.5377	0.0046
1200	1.5629	1.5728	1.5528	1.5443	1.5519	1.5569	0.0111

ตาราง จ.11 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.8838	0.8330	0.8332	0.8642	0.8785	0.8585	0.0243
200	0.9725	0.9927	0.9746	1.0220	1.0156	0.9955	0.0228
300	1.0345	1.0283	1.0723	1.0006	1.0536	1.0379	0.0270
400	1.0558	1.0743	1.0734	1.0613	1.0459	1.0621	0.0120
500	1.0932	1.0888	1.0834	1.1153	1.0615	1.0884	0.0193
600	1.1610	1.2350	1.1629	1.1868	1.1737	1.1839	0.0304
700	1.2316	1.2749	1.2434	1.2206	1.2340	1.2409	0.0207
800	1.2897	1.2849	1.2727	1.2710	1.2816	1.2800	0.0080
900	1.3462	1.3467	1.3522	1.3484	1.3288	1.3445	0.0091
1000	1.3659	1.3761	1.3906	1.3885	1.3841	1.3810	0.0101
1100	1.4074	1.4010	1.3994	1.3790	1.3852	1.3859	0.0118
1200	1.4130	1.4182	1.4028	1.4067	1.4144	1.4110	0.0062

ตาราง จ.12 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.8775	0.8875	0.8910	0.8785	0.8825	0.8834	0.0058
200	0.9560	0.9003	0.8946	0.9058	0.8948	0.9103	0.0260
300	0.8896	0.9662	0.9239	0.8995	1.0006	0.9360	0.0467
400	1.0500	1.0746	0.9222	0.9765	0.9447	0.9936	0.0662
500	1.0966	1.0978	1.0869	1.0766	1.0828	1.0881	0.0091
600	1.1859	1.1272	1.1176	1.1139	1.1344	1.1358	0.0291
700	1.1620	1.1412	1.1504	1.1646	1.1574	1.1551	0.0095
800	1.1523	1.1455	1.1917	1.1681	1.1602	1.1636	0.0179
900	1.2194	1.2086	1.2128	1.2142	1.2040	1.2118	0.0058
1000	1.2696	1.2701	1.2180	1.2599	1.2261	1.2487	0.0249
1100	1.2160	1.2215	1.2362	1.2770	1.2156	1.2333	0.0258
1200	1.2386	1.2390	1.2641	1.2301	1.2291	1.2402	0.0141

ตาราง จ.13 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	1.0419	1.0414	1.0618	1.0530	1.0330	1.0462	0.0112
200	1.1390	1.1088	1.1146	1.1055	1.0866	1.1109	0.0189
300	1.1897	1.1167	1.1213	1.1580	1.1379	1.1447	0.0299
400	1.1289	1.1512	1.1480	1.1357	1.2200	1.1568	0.0365
500	1.2654	1.2790	1.2479	1.2890	1.2849	1.2732	0.0167
600	1.3892	1.3795	1.3639	1.3412	1.3382	1.3624	0.0226
700	1.3699	1.3952	1.3464	1.3736	1.3929	1.3756	0.0198
800	1.4023	1.4344	1.4318	1.3844	1.3872	1.4080	0.0239
900	1.4852	1.4680	1.5044	1.4932	1.5028	1.4907	0.0149
1000	1.5485	1.5473	1.5115	1.4978	1.4756	1.5161	0.0317
1100	1.5760	1.5854	1.5647	1.5850	1.5662	1.5755	0.0099
1200	1.6017	1.5941	1.6345	1.6106	1.6223	1.6126	0.0161

ตาราง จ.14 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.9972	0.9950	0.9856	1.0003	0.9861	0.9928	0.0067
200	1.0290	1.0870	1.0367	1.0394	0.9841	1.0352	0.0366
300	1.0229	1.0300	1.0284	1.0750	1.0442	1.0401	0.0210
400	1.1126	1.1025	1.1098	1.1066	1.0703	1.1004	0.0172
500	1.0888	1.1191	1.1614	1.0790	1.0992	1.1095	0.0326
600	1.0986	1.1510	1.1335	1.1419	1.1182	1.1286	0.0207
700	1.1102	1.1584	1.1635	1.1514	1.1476	1.1462	0.0211
800	1.1955	1.1207	1.1466	1.1518	1.1799	1.1589	0.0293
900	1.2690	1.1693	1.1849	1.2338	1.1917	1.2097	0.0408
1000	1.3238	1.2503	1.2845	1.2478	1.2507	1.2714	0.0330
1100	1.2722	1.2568	1.2776	1.2967	1.2606	1.2728	0.0158
1200	1.3283	1.3258	1.3022	1.2808	1.2779	1.3030	0.0239

ตาราง จ.15 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	1.0932	1.0966	1.0519	1.0976	1.0765	1.0832	0.0194
200	1.0915	1.1047	1.0937	1.0892	1.0888	1.0936	0.0065
300	1.0979	1.0763	1.0990	1.1151	1.0980	1.0973	0.0138
400	1.0938	1.0973	1.0984	1.0977	1.0998	1.0974	0.0022
500	1.1165	1.1131	1.0833	1.1113	1.1445	1.1137	0.0217
600	1.1101	1.1107	1.1070	1.1033	1.1185	1.1099	0.0056
700	1.1295	1.1537	1.1033	1.1260	1.1291	1.1283	0.0179
800	1.1163	1.1279	1.1019	1.1085	1.1379	1.1185	0.0145
900	1.1920	1.1331	1.1379	1.1533	1.1639	1.1560	0.0235
1000	1.2141	1.1769	1.1293	1.1656	1.0995	1.1571	0.0442
1100	1.2053	1.1874	1.1319	1.1356	1.1984	1.1717	0.0353
1200	1.1945	1.2028	1.1722	1.2034	1.2129	1.1972	0.0154

ตาราง จ.16 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.7000	0.020486617	0.003948178
100	200	0.8904	0.033217743	0.010365261
100	300	1.0040	0.042300563	0.016791603
100	400	1.0776	0.048780835	0.022314340
100	500	1.1814	0.058733286	0.032312536
100	600	1.2159	0.06225044	0.036284105
100	700	1.2776	0.06879763	0.044285369
100	800	1.3172	0.073182751	0.050086131
100	900	1.3523	0.07718488	0.055689043
100	1000	1.3900	0.081616698	0.062236843
100	1100	1.4317	0.086658486	0.070123911
100	1200	1.4629	0.090535978	0.076506328

ตาราง จ.17 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.7726	0.024976541	0.00586548
100	200	0.9301	0.036264435	0.012349639
100	300	1.0335	0.044836704	0.018860111
100	400	1.1171	0.052454937	0.025791703
100	500	1.1634	0.056934125	0.030369324
100	600	1.2359	0.06432929	0.03873897
100	700	1.2899	0.070144646	0.046029564
100	800	1.3117	0.072569786	0.049254003
100	900	1.3548	0.077481276	0.056115700
100	1000	1.3871	0.08126701	0.061707096
100	1100	1.4246	0.085786048	0.068725794
100	1200	1.4643	0.09071205	0.076802674

ตาราง จ.18 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6693	0.018721287	0.003297714
100	200	0.8108	0.027516367	0.007117021
100	300	0.9180	0.03532453	0.011719005
100	400	1.0063	0.042494281	0.016945385
100	500	1.0657	0.047700747	0.021339702
100	600	1.1380	0.054452448	0.027787222
100	700	1.1525	0.055868059	0.029246153
100	800	1.1776	0.058346326	0.031889541
100	900	1.2256	0.063249981	0.037454482
100	1000	1.2465	0.065454134	0.040100523
100	1100	1.2488	0.065698611	0.040399535
100	1200	1.2648	0.067416677	0.042531936

ตาราง จ.19 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.9218	0.035614666	0.011911917
100	200	1.0829	0.049264036	0.022757373
100	300	1.1465	0.0552766	0.028632083
100	400	1.2339	0.064123181	0.038492017
100	500	1.3021	0.071494081	0.047810397
100	600	1.3370	0.075425759	0.053190035
100	700	1.3514	0.077085443	0.055546265
100	800	1.3840	0.080896768	0.061148656
100	900	1.4183	0.085020364	0.067510242
100	1000	1.4865	0.093530566	0.081623665
100	1100	1.5377	0.100200193	0.093609675
100	1200	1.5569	0.102762616	0.098430313

ตาราง จ.20 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.8585	0.030870958	0.008954758
100	200	0.9955	0.041578987	0.016224923
100	300	1.0379	0.045222233	0.019185017
100	400	1.0621	0.047380035	0.021054469
100	500	1.0884	0.049775501	0.023231037
100	600	1.1839	0.058978573	0.032582097
100	700	1.2409	0.064860856	0.039379487
100	800	1.2800	0.0690594	0.044621708
100	900	1.3445	0.07628544	0.054404193
100	1000	1.3810	0.080551057	0.060629488
100	1100	1.3859	0.081126879	0.061495439
100	1200	1.4110	0.084137239	0.066121588

ตาราง จ.21 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.8834	0.032694638	0.010041958
100	200	0.9103	0.034727925	0.011327251
100	300	0.9360	0.036725676	0.012665131
100	400	0.9936	0.04142099	0.016102135
100	500	1.0881	0.049747835	0.023205292
100	600	1.1358	0.054242103	0.027573606
100	700	1.1551	0.056120851	0.029510584
100	800	1.1636	0.056951915	0.030388245
100	900	1.2118	0.061822812	0.035789024
100	1000	1.2487	0.065692228	0.040391713
100	1100	1.2333	0.064055954	0.038411638
100	1200	1.2402	0.064784779	0.039287498

ตาราง จ.22 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	1.0462	0.04595939	0.019813945
100	200	1.1109	0.051869186	0.025220551
100	300	1.1447	0.05510543	0.028455577
100	400	1.1568	0.056281845	0.029679607
100	500	1.2732	0.068325568	0.043682026
100	600	1.3624	0.07836235	0.057393521
100	700	1.3756	0.079909049	0.059671176
100	800	1.4080	0.083774714	0.065555568
100	900	1.4907	0.094068399	0.082560107
100	1000	1.5161	0.097358121	0.08840293
100	1100	1.5755	0.105266602	0.10325653
100	1200	1.6126	0.110389636	0.113486111

ตาราง จ.23 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.9928	0.041357206	0.016052696
100	200	1.0352	0.044992464	0.018991047
100	300	1.0401	0.04541915	0.019352036
100	400	1.1004	0.050881154	0.024271553
100	500	1.1095	0.051737387	0.025092913
100	600	1.1286	0.053554186	0.026880711
100	700	1.1462	0.055251296	0.028605956
100	800	1.1589	0.05649228	0.029901259
100	900	1.2097	0.061610597	0.035544589
100	1000	1.2714	0.068128107	0.043430869
100	1100	1.2728	0.068275632	0.043618443
100	1200	1.3030	0.071596382	0.04794677

ตาราง จ.24 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชูบแข็ง ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	1.0832	0.049289729	0.02278105
100	200	1.0936	0.05025074	0.023675501
100	300	1.0973	0.050592412	0.023997635
100	400	1.0974	0.050605433	0.024009955
100	500	1.1137	0.052137079	0.025480978
100	600	1.1099	0.051776908	0.025131153
100	700	1.1283	0.053523546	0.026850054
100	800	1.1185	0.052587671	0.025922012
100	900	1.1560	0.056211135	0.029605312
100	1000	1.1571	0.056313286	0.029712672
100	1100	1.1717	0.057761386	0.031255385
100	1200	1.1972	0.06032281	0.034079118

ตาราง จ.25 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.1275	0.1177	0.1251	0.1191	0.1170	0.1213	0.0047
200	0.1260	0.1217	0.1255	0.1271	0.1284	0.1257	0.0025
300	0.1378	0.1407	0.1363	0.1315	0.1316	0.1356	0.0040
400	0.1499	0.1419	0.1494	0.1416	0.1360	0.1438	0.0059
500	0.1489	0.1434	0.1476	0.1412	0.1476	0.1457	0.0033
600	0.1480	0.1471	0.1535	0.1518	0.1515	0.1504	0.0027
700	0.1593	0.1550	0.1439	0.1418	0.1596	0.1519	0.0085
800	0.1557	0.1512	0.1545	0.1517	0.1517	0.1530	0.0020
900	0.1575	0.1544	0.1561	0.1523	0.1582	0.1557	0.0024
1000	0.1593	0.1584	0.1545	0.1560	0.1519	0.1560	0.0030
1100	0.1527	0.1595	0.1555	0.1575	0.1613	0.1573	0.0034
1200	0.1625	0.1358	0.1658	0.1651	0.1673	0.1593	0.0133

ตาราง จ.26 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.1475	0.1611	0.1558	0.1637	0.1528	0.1562	0.0065
200	0.1709	0.1640	0.1668	0.1785	0.1734	0.1707	0.0057
300	0.1735	0.1771	0.1770	0.1738	0.1703	0.1743	0.0028
400	0.1734	0.1762	0.1725	0.1843	0.1739	0.1761	0.0048
500	0.1778	0.1705	0.1790	0.1788	0.1800	0.1772	0.0038
600	0.1718	0.1777	0.1779	0.1794	0.1842	0.1782	0.0044
700	0.1803	0.1728	0.1854	0.1796	0.1832	0.1803	0.0048
800	0.1828	0.1803	0.1820	0.1820	0.1842	0.1823	0.0014
900	0.1872	0.1874	0.1751	0.1788	0.1912	0.1839	0.0067
1000	0.1783	0.1801	0.1810	0.1764	0.1761	0.1784	0.0022
1100	0.1783	0.1785	0.1813	0.1785	0.1807	0.1795	0.0014
1200	0.1788	0.1915	0.1909	0.1951	0.1819	0.1876	0.0069

ตาราง จ.27 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.1440	0.1190	0.1141	0.1139	0.1164	0.1215	0.0128
200	0.1294	0.1342	0.1307	0.1257	0.1215	0.1283	0.0049
300	0.1446	0.1401	0.1398	0.1407	0.1362	0.1403	0.0030
400	0.1462	0.1477	0.1470	0.1444	0.1460	0.1463	0.0012
500	0.1515	0.1518	0.1510	0.1528	0.1475	0.1509	0.0020
600	0.1543	0.1529	0.1520	0.1585	0.1521	0.1540	0.0027
700	0.1507	0.1804	0.1968	0.1451	0.1850	0.1716	0.0225
800	0.1916	0.1969	0.1888	0.1878	0.2401	0.2010	0.0221
900	0.2879	0.2732	0.3289	0.2734	0.3061	0.2939	0.0238
1000	0.2604	0.2421	0.2173	0.2449	0.2799	0.2489	0.0232
1100	0.3231	0.3287	0.3516	0.3412	0.3934	0.3476	0.0279
1200	0.4661	0.4821	0.4910	0.4746	0.4988	0.4825	0.0129

ตาราง จ.28 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1213	0.000612931	3.54192E-06
100	200	0.1257	0.000658845	4.09243E-06
100	300	0.1356	0.000766012	5.53197E-06
100	400	0.1438	0.000861246	6.99292E-06
100	500	0.1457	0.000885137	7.38625E-06
100	600	0.1504	0.000942404	8.37288E-06
100	700	0.1519	0.000961808	8.7212E-06
100	800	0.1530	0.000975024	8.9625E-06
100	900	0.1557	0.001010274	9.62222E-06
100	1000	0.1560	0.001014432	9.70158E-06
100	1100	0.1573	0.001031148	1.00239E-05
100	1200	0.1593	0.00105754	1.05436E-05

ตาราง จ.29 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1562	0.001016514	3.54192E-06
100	200	0.1707	0.001214634	4.09243E-06
100	300	0.1743	0.001266702	5.53197E-06
100	400	0.1761	0.001291825	6.99292E-06
100	500	0.1772	0.001308908	7.38625E-06
100	600	0.1782	0.001323427	8.37288E-06
100	700	0.1803	0.001354208	8.7212E-06
100	800	0.1823	0.001384432	8.9625E-06
100	900	0.1839	0.001410078	9.62222E-06
100	1000	0.1784	0.001326102	9.70158E-06
100	1100	0.1795	0.001342212	1.00239E-05
100	1200	0.1876	0.001467391	1.05436E-05

ตาราง จ.30 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1215	0.000614954	3.56535E-06
100	200	0.1283	0.000685949	4.43605E-06
100	300	0.1403	0.000820049	6.33995E-06
100	400	0.1463	0.000891465	7.49224E-06
100	500	0.1509	0.000949185	8.4938E-06
100	600	0.1540	0.000987816	9.19921E-06
100	700	0.1716	0.001227191	1.41975E-05
100	800	0.2010	0.001684518	2.67495E-05
100	900	0.2939	0.003601212	0.000122228
100	1000	0.2489	0.002582827	6.28799E-05
100	1100	0.3476	0.005038638	0.000239237
100	1200	0.4825	0.009716801	0.000889249

ตาราง จ.31 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1664	0.001154484	1.25651E-05
100	200	0.1769	0.001304184	1.60347E-05
100	300	0.2063	0.001773501	2.96499E-05
100	400	0.2828	0.003333708	0.000104747
100	500	0.4178	0.007282738	0.00049967
100	600	0.5449	0.012397115	0.001447067
100	700	0.6484	0.017569052	0.002904651
100	800	0.7314	0.022371611	0.004707166
100	900	0.7555	0.023876264	0.005360743
100	1000	0.7994	0.026743217	0.006723274
100	1100	0.8452	0.029914271	0.008409241
100	1200	0.8961	0.033643798	0.010632353

ตาราง จ.32 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1833	0.001400586	1.84926E-05
100	200	0.1925	0.001544408	2.24851E-05
100	300	0.1954	0.00159163	2.3881E-05
100	400	0.2097	0.001832464	3.1654E-05
100	500	0.2172	0.001967029	3.64731E-05
100	600	0.2698	0.003033636	8.67414E-05
100	700	0.4002	0.006680774	0.000420511
100	800	0.5242	0.011472211	0.001239328
100	900	0.5841	0.014250353	0.001911652
100	1000	0.6653	0.018497479	0.003219419
100	1100	0.7439	0.023147098	0.005038724
100	1200	0.8115	0.027565486	0.007142414

ตาราง จ.33 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1707	0.00121378	1.38889E-05
100	200	0.2062	0.001771781	2.95924E-05
100	300	0.2237	0.002086542	4.10392E-05
100	400	0.3630	0.005494802	0.000284502
100	500	0.4676	0.0091235	0.000784022
100	600	0.5657	0.013361892	0.001680879
100	700	0.6462	0.017447517	0.002864642
100	800	0.7471	0.023348706	0.005126765
100	900	0.7726	0.024975242	0.005864871
100	1000	0.8279	0.028693561	0.007737987
100	1100	0.8770	0.032221541	0.009753958
100	1200	0.9155	0.035125087	0.011587305

ตาราง จ.34 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.2937	0.003596309	0.000121895
100	200	0.3013	0.003783953	0.000134944
100	300	0.3057	0.003897404	0.000143156
100	400	0.3063	0.003910682	0.000144133
100	500	0.3085	0.00396762	0.000148359
100	600	0.3099	0.004004256	0.000151111
100	700	0.3106	0.004023415	0.00015256
100	800	0.4319	0.007783938	0.00057078
100	900	0.5733	0.013724185	0.001773194
100	1000	0.7417	0.023011108	0.004979768
100	1100	0.8589	0.030896988	0.00896984
100	1200	0.9560	0.038327088	0.013791265

ตาราง จ.35 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1608	0.001077017	1.09355E-05
100	200	0.2204	0.002023955	3.86144E-05
100	300	0.2898	0.003500411	0.000115482
100	400	0.4508	0.008478003	0.000677055
100	500	0.5716	0.013645593	0.001752959
100	600	0.6865	0.0197003	0.003651236
100	700	0.7856	0.025826474	0.006270874
100	800	0.8914	0.033289812	0.010410203
100	900	0.9176	0.035288929	0.011695442
100	1000	0.9736	0.039757528	0.014837539
100	1100	1.0241	0.044025657	0.018185612
100	1200	1.1022	0.051052935	0.024435249

ตาราง จ.36 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม DLC ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1450	0.000876411	7.24135E-06
100	200	0.1548	0.00099811	9.39193E-06
100	300	0.1628	0.001103987	1.149E-05
100	400	0.1744	0.001268156	1.51611E-05
100	500	0.2505	0.002614898	6.4451E-05
100	600	0.3103	0.004015642	0.000151971
100	700	0.5245	0.01148537	0.001242171
100	800	0.6653	0.018498595	0.003219807
100	900	0.6988	0.020418542	0.003922012
100	1000	0.7959	0.026508498	0.006605947
100	1100	0.9045	0.03428272	0.011039235
100	1200	0.9822	0.04046618	0.015369977

ตาราง จ.37 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่ การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3080	0.3023	0.3053	0.3213	0.3090	0.3092	0.0073
200	0.3543	0.3264	0.3753	0.3490	0.3760	0.3562	0.0206
300	0.3513	0.3327	0.3871	0.3647	0.3885	0.3649	0.0238
400	0.5177	0.5226	0.4865	0.4783	0.4868	0.4984	0.0202
500	0.5154	0.5124	0.4967	0.5017	0.4917	0.5036	0.0101
600	0.5708	0.5869	0.5268	0.5023	0.4949	0.5363	0.0410
700	0.5389	0.5882	0.5709	0.6011	0.5293	0.5657	0.0309
800	0.6294	0.6307	0.5932	0.5935	0.6072	0.6108	0.0185
900	0.6012	0.6045	0.6414	0.6438	0.6188	0.6219	0.0200
1000	0.6591	0.6681	0.6121	0.6495	0.6331	0.6444	0.0222
1100	0.7116	0.7058	0.6824	0.6609	0.6901	0.6902	0.0201
1200	0.7606	0.7587	0.7297	0.7174	0.9319	0.7797	0.0871

ตาราง จ.38 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3299	0.3313	0.3693	0.3478	0.3639	0.3484	0.0181
200	0.3874	0.3714	0.3822	0.3771	0.3775	0.3791	0.0060
300	0.4293	0.4091	0.4229	0.4116	0.4226	0.4191	0.0085
400	0.4039	0.3941	0.4555	0.4284	0.4508	0.4265	0.0274
500	0.4241	0.4559	0.4549	0.4577	0.4313	0.4448	0.0158
600	0.4987	0.4905	0.4669	0.4528	0.4840	0.4786	0.0186
700	0.5338	0.5386	0.5244	0.5285	0.5137	0.5278	0.0095
800	0.5293	0.5260	0.5430	0.5469	0.5194	0.5329	0.0116
900	0.5946	0.6119	0.5505	0.5705	0.5576	0.5770	0.0257
1000	0.6025	0.6416	0.5539	0.5715	0.5902	0.5919	0.0333
1100	0.6345	0.6490	0.6035	0.5944	0.5931	0.6149	0.0254
1200	0.7006	0.7144	0.7048	0.7165	0.7309	0.7134	0.0118

ตาราง จ.39 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]					
	1	2	3	4	5	Average
100	0.3709	0.3379	0.3703	0.3577	0.3431	0.3560
200	0.4168	0.4104	0.4368	0.4480	0.4084	0.4241
300	0.4039	0.3941	0.4555	0.4284	0.4508	0.4265
400	0.5356	0.5404	0.4917	0.5014	0.5001	0.5138
500	0.5104	0.5420	0.5505	0.5080	0.5232	0.5268
600	0.5369	0.5592	0.5114	0.5217	0.5395	0.5337
700	0.6115	0.6081	0.5734	0.5652	0.5870	0.5890
800	0.6158	0.6222	0.5940	0.5769	0.6050	0.6028
900	0.6116	0.6237	0.5929	0.6095	0.5797	0.6035
1000	0.6499	0.6456	0.5868	0.6165	0.6118	0.6221
1100	0.6733	0.6636	0.6140	0.6249	0.6307	0.6413
1200	0.6656	0.6629	0.7080	0.7244	0.6639	0.6850

ตาราง จ.40 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5022	0.4973	0.5623	0.5265	0.5135	0.5204	0.0260
200	0.5780	0.5824	0.6251	0.5799	0.5974	0.5926	0.0197
300	0.7784	0.8063	0.8604	0.8401	0.8157	0.8202	0.0315
400	0.8322	0.8063	0.8604	0.8401	0.8157	0.8309	0.0212
500	0.9034	0.9123	0.9180	0.9283	0.9334	0.9191	0.0121
600	1.0233	1.0376	1.0208	0.9943	1.0065	1.0165	0.0166
700	1.0391	1.0269	1.0681	1.0541	1.0783	1.0533	0.0209
800	1.1313	1.0930	1.1441	1.1228	1.1044	1.1191	0.0205
900	1.2083	1.1991	1.1566	1.1546	1.1686	1.1774	0.0248
1000	1.2326	1.2208	1.2319	1.2229	1.2263	1.2269	0.0053
1100	1.2641	1.2549	1.2588	1.2542	1.2552	1.2574	0.0041
1200	1.2830	1.2499	1.3655	1.2404	1.2750	1.2828	0.0494

ตาราง จ.41 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4528	0.4384	0.6535	0.6464	0.5356	0.5453	0.1025
200	0.7350	0.8000	0.7694	0.7887	0.7726	0.7731	0.0247
300	0.8630	0.8778	0.8394	0.8639	0.8701	0.8628	0.0144
400	0.9779	1.0266	0.9578	0.9802	0.9467	0.9778	0.0306
500	1.0247	1.0404	1.0256	1.0168	1.0120	1.0239	0.0108
600	1.1069	1.0892	1.0951	1.0645	1.0617	1.0835	0.0197
700	1.1698	1.1224	1.1165	1.1138	1.1032	1.1251	0.0259
800	1.1891	1.2077	1.1830	1.1730	1.1669	1.1839	0.0158
900	1.2058	1.1951	1.2040	1.1753	1.1859	1.1932	0.0128
1000	1.1240	1.2124	1.2053	1.2276	1.1978	1.1934	0.0403
1100	1.2429	1.2064	1.2070	1.2156	1.2488	1.2241	0.0203
1200	1.3251	1.3005	1.2991	1.2760	1.2921	1.2986	0.0177

ตาราง จ.42 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5554	0.5400	0.6032	0.5655	0.5532	0.5635	0.0240
200	0.7559	0.7418	0.8126	0.8040	0.7868	0.7802	0.0305
300	0.8190	0.8142	0.8539	0.8384	0.8431	0.8337	0.0167
400	0.8905	0.8949	0.9201	0.8917	0.9077	0.9010	0.0127
500	0.9587	0.9685	0.9781	0.9431	0.9731	0.9643	0.0138
600	1.0054	0.9956	1.0011	0.9872	0.9988	0.9976	0.0068
700	1.0172	1.0237	1.0286	1.0139	1.0161	1.0199	0.0061
800	1.1191	1.0909	1.0619	1.0899	1.0981	1.0920	0.0205
900	1.1276	1.1165	1.1246	1.1075	1.0951	1.1143	0.0133
1000	1.1257	1.1611	1.1425	1.1379	1.1389	1.1412	0.0128
1100	1.1530	1.1680	1.1769	1.1471	1.1692	1.1628	0.0123
1200	1.2041	1.1797	1.1924	1.2038	1.1911	1.1942	0.0102

ตาราง จ.43 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5312	0.6286	0.5277	0.5346	0.5925	0.5629	0.0454
200	0.7641	0.7551	0.7701	0.7539	0.7727	0.7632	0.0085
300	0.8724	0.9548	0.9219	0.9089	0.8728	0.9062	0.0349
400	1.0657	1.0855	1.0414	1.0188	1.0518	1.0526	0.025112
500	1.0818	1.0842	1.1034	1.1086	1.1006	1.0957	0.011991
600	1.1600	1.1697	1.1816	1.1528	1.1936	1.1715	0.016398
700	1.2232	1.2343	1.2100	1.2797	1.2230	1.2340	0.026936
800	1.2868	1.2982	1.2846	1.2979	1.2945	1.2924	0.006334
900	1.3240	1.3103	1.3652	1.3380	1.3108	1.3297	0.022887
1000	1.3506	1.3381	1.3304	1.3199	1.3212	1.3320	0.012736
1100	1.4763	1.4705	1.4734	1.4447	1.4587	1.4647	0.013037
1200	1.4752	1.3959	1.5082	1.4989	1.4639	1.4684	0.044263

ตาราง จ.44 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5672	0.5737	0.6393	0.6184	0.6045	0.6006	0.0303
200	0.7795	0.7758	0.8910	0.8813	0.7760	0.8207	0.0598
300	0.9102	0.9097	0.9025	0.8930	0.9083	0.9047	0.0072
400	0.9890	0.9867	1.0215	1.0346	1.0109	1.0085	0.0207
500	1.0294	1.0254	1.0562	1.0419	1.0336	1.0373	0.0122
600	1.0695	1.0601	1.1111	1.0893	1.0394	1.0739	0.0275
700	1.1782	1.1888	1.1606	1.1606	1.1506	1.1678	0.0154
800	1.1741	1.1598	1.2109	1.1770	1.1873	1.1818	0.0190
900	1.2443	1.2400	1.1901	1.2454	1.2241	1.2288	0.0232
1000	1.2688	1.2762	1.2889	1.2604	1.2921	1.2773	0.0133
1100	1.3060	1.3124	1.3320	1.3106	1.3321	1.3186	0.0125
1200	1.3678	1.3638	1.3611	1.3666	1.3604	1.3639	0.0033

ตาราง จ.45 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]					
	1	2	3	4	5	Average
100	0.5629	0.5726	0.6427	0.6929	0.5829	0.6108
200	0.7374	0.7961	0.8744	0.7821	0.8206	0.8021
300	0.8707	0.9623	0.9023	0.8865	0.9150	0.9074
400	0.9204	0.9120	0.9138	0.8980	0.9097	0.9108
500	0.9532	0.9438	1.0126	0.9741	1.0157	0.9799
600	0.9939	0.9850	1.0148	1.0376	1.0229	1.0108
700	1.0317	1.0849	1.0560	1.0961	1.0628	1.0663
800	1.0926	1.0741	1.1127	1.0992	1.0736	1.0904
900	1.1696	1.1608	1.1693	1.1651	1.1585	1.1647
1000	1.1976	1.1879	1.2204	1.2059	1.1926	1.2009
1100	1.1977	1.2128	1.1978	1.2248	1.1969	1.2060
1200	1.1993	1.2074	1.2504	1.2290	1.2133	1.2199

ตาราง จ.46 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3092	0.00399	0.00015
100	200	0.3562	0.00529	0.00026
100	300	0.3649	0.00555	0.00029
100	400	0.4984	0.01037	0.00101
100	500	0.5036	0.01059	0.00106
100	600	0.5363	0.01201	0.00136
100	700	0.5657	0.01336	0.00168
100	800	0.6108	0.01559	0.00229
100	900	0.6219	0.01616	0.00246
100	1000	0.6444	0.01735	0.00283
100	1100	0.6902	0.01991	0.00373
100	1200	0.7797	0.02544	0.00608

ตาราง จ.47 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3484	0.00506304	0.00024156
100	200	0.3791	0.005994822	0.000338617
100	300	0.4191	0.007327482	0.000505827
100	400	0.4265	0.007590284	0.000542745
100	500	0.4448	0.008254241	0.000641803
100	600	0.4786	0.009558512	0.000860528
100	700	0.5278	0.011629743	0.001273575
100	800	0.5329	0.01185692	0.001323784
100	900	0.5770	0.013905229	0.001820249
100	1000	0.5919	0.014635406	0.00201627
100	1100	0.6149	0.015795835	0.002348379
100	1200	0.7134	0.021283692	0.004261

ตาราง จ.48 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3560	0.005284728	0.00026317
100	200	0.4241	0.007502876	0.000530321
100	300	0.4265	0.007590284	0.000542745
100	400	0.5138	0.01102156	0.001143931
100	500	0.5268	0.011586513	0.00126413
100	600	0.5337	0.011893509	0.001331961
100	700	0.5890	0.014492008	0.001976984
100	800	0.6028	0.015177716	0.002168332
100	900	0.6035	0.015213078	0.002178439
100	1000	0.6221	0.016169965	0.002460838
100	1100	0.6413	0.017185293	0.002779263
100	1200	0.6850	0.019612869	0.003618934

ตาราง จ.49 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5204	0.011303567	0.001203181
100	200	0.5926	0.014666156	0.002024744
100	300	0.8202	0.028161143	0.007453932
100	400	0.8309	0.028908504	0.007854163
100	500	0.9191	0.035405089	0.011772411
100	600	1.0165	0.043366452	0.017646394
100	700	1.0533	0.046588451	0.020358627
100	800	1.1191	0.052646508	0.025979879
100	900	1.1774	0.058332316	0.031874278
100	1000	1.2269	0.063389863	0.037619743
100	1100	1.2574	0.066621204	0.041537857
100	1200	1.2828	0.069363261	0.045013711

ตาราง จ.50 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5453	0.012417186	0.001451753
100	200	0.7731	0.025010054	0.005881209
100	300	0.8628	0.031182595	0.009136147
100	400	0.9778	0.040108577	0.015100129
100	500	1.0239	0.044004872	0.018168487
100	600	1.0835	0.0493191	0.022808134
100	700	1.1251	0.053219554	0.026546828
100	800	1.1839	0.058984611	0.032588747
100	900	1.1932	0.059922364	0.033629666
100	1000	1.1934	0.059942658	0.033652372
100	1100	1.2241	0.063101923	0.037279955
100	1200	1.2986	0.071103368	0.04729133

ตาราง จ.51 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5635	0.013257928	0.001654844
100	200	0.7802	0.025472443	0.00610037
100	300	0.8337	0.029103209	0.007960146
100	400	0.9010	0.034016393	0.010868706
100	500	0.9643	0.038998248	0.014277433
100	600	0.9976	0.041759208	0.016365551
100	700	1.0199	0.043659188	0.01788485
100	800	1.0920	0.050102558	0.023536465
100	900	1.1143	0.052186206	0.025528881
100	1000	1.1412	0.054765845	0.028107012
100	1100	1.1628	0.056880773	0.030312614
100	1200	1.1942	0.06002387	0.033743313

ตาราง จ.52 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5629	0.013232472	0.0016485
100	200	0.7632	0.02436745	0.00558327
100	300	0.9062	0.034410933	0.011121801
100	400	1.0526	0.046529625	0.02030738
100	500	1.0957	0.050449285	0.023862429
100	600	1.1715	0.057743467	0.031236058
100	700	1.2340	0.064137892	0.038509617
100	800	1.2924	0.07042229	0.046393228
100	900	1.3297	0.074593862	0.052028051
100	1000	1.3320	0.074864557	0.052404758
100	1100	1.4647	0.090764906	0.076891748
100	1200	1.4684	0.091231244	0.07767983

ตาราง จ.53 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6006	0.015068861	0.002137367
100	200	0.8207	0.028198413	0.007473644
100	300	0.9047	0.034302547	0.011051983
100	400	1.0085	0.042685041	0.017097501
100	500	1.0373	0.045173071	0.019143433
100	600	1.0739	0.048441863	0.022006131
100	700	1.1678	0.05736782	0.030832266
100	800	1.1818	0.058771452	0.032354405
100	900	1.2288	0.063586383	0.037852529
100	1000	1.2773	0.068764945	0.044243462
100	1100	1.3186	0.073344857	0.050307355
100	1200	1.3639	0.078541987	0.057655799

ตาราง จ.54 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม CrN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6108	0.015585344	0.002286262
100	200	0.8021	0.02692905	0.006816894
100	300	0.9074	0.034502663	0.01118106
100	400	0.9108	0.034764774	0.011351255
100	500	0.9799	0.040277243	0.015227108
100	600	1.0108	0.042881365	0.017254759
100	700	1.0663	0.047754909	0.02138806
100	800	1.0904	0.049960144	0.023403226
100	900	1.1647	0.057060692	0.030504066
100	1000	1.2009	0.060702158	0.034507623
100	1100	1.2060	0.061226276	0.035104034
100	1200	1.2199	0.062658822	0.036760057

ตาราง จ.55 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.1907	0.1821	0.2175	0.2023	0.1876	0.1960	0.0141
200	0.2509	0.2259	0.2024	0.1929	0.2090	0.2162	0.0228
300	0.2431	0.2155	0.2176	0.2111	0.2191	0.2213	0.0126
400	0.2023	0.2199	0.1979	0.2609	0.2259	0.2214	0.0250
500	0.2826	0.1846	0.2097	0.2455	0.2699	0.2385	0.0410
600	0.2376	0.2434	0.2817	0.2960	0.3325	0.2782	0.0392
700	0.2892	0.2904	0.2772	0.2800	0.2822	0.2838	0.0058
800	0.2868	0.3624	0.3175	0.2049	0.2803	0.2904	0.0578
900	0.2302	0.2803	0.2407	0.3596	0.3487	0.2919	0.0599
1000	0.2892	0.2904	0.2772	0.2800	0.2822	0.2838	0.0058
1100	0.3135	0.2609	0.3731	0.3746	0.3687	0.3382	0.0501
1200	0.3559	0.3673	0.3624	0.3175	0.3631	0.3532	0.0204

ตาราง จ.56 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3060	0.2958	0.2774	0.2931	0.2984	0.2941	0.0105
200	0.3139	0.3391	0.3017	0.2883	0.3167	0.3119	0.0189
300	0.3019	0.3061	0.3217	0.3214	0.3292	0.3161	0.0115
400	0.3184	0.3181	0.3044	0.3171	0.3242	0.3164	0.0073
500	0.3530	0.3037	0.3256	0.3218	0.3104	0.3229	0.0190
600	0.3269	0.3022	0.3309	0.3436	0.3238	0.3255	0.0150
700	0.3381	0.3354	0.3327	0.3038	0.3232	0.3266	0.0139
800	0.3473	0.3165	0.3400	0.3239	0.3138	0.3283	0.0147
900	0.3337	0.3513	0.3244	0.3120	0.3207	0.3284	0.0150
1000	0.3391	0.3412	0.3165	0.3218	0.3238	0.3285	0.0110
1100	0.3452	0.3142	0.3563	0.3169	0.3124	0.3290	0.0203
1200	0.3384	0.3109	0.3455	0.3457	0.3092	0.3299	0.0184

ตาราง จ.57 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3106	0.2282	0.2585	0.3979	0.2967	0.2984	0.0644
200	0.3348	0.3450	0.3060	0.3063	0.3027	0.3190	0.0195
300	0.3429	0.3046	0.3191	0.3272	0.3250	0.3238	0.0139
400	0.3644	0.3541	0.3844	0.3538	0.3367	0.3587	0.0175
500	0.3670	0.3543	0.3740	0.3540	0.3459	0.3590	0.0113
600	0.3678	0.3707	0.3509	0.3548	0.3831	0.3655	0.0129
700	0.3660	0.3651	0.3743	0.3600	0.3665	0.3664	0.0051
800	0.3588	0.3974	0.3513	0.3778	0.3566	0.3684	0.0191
900	0.3769	0.3814	0.3820	0.3548	0.3484	0.3687	0.0159
1000	0.3621	0.3762	0.3817	0.3696	0.3558	0.3691	0.0104
1100	0.3933	0.3720	0.3652	0.3663	0.3548	0.3703	0.0143
1200	0.3676	0.3800	0.3729	0.3641	0.3684	0.3706	0.0061

ตาราง จ.58 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3919	0.3983	0.3802	0.3832	0.4130	0.3933	0.0131
200	0.4273	0.3958	0.3951	0.4338	0.3912	0.3828	0.0202
300	0.4453	0.4202	0.3739	0.4099	0.4071	0.4193	0.0258
400	0.6142	0.3103	0.5553	0.5846	0.5976	0.5324	0.1260
500	0.6059	0.5838	0.5415	0.6117	0.6014	0.5889	0.0285
600	0.5704	0.6166	0.6017	0.6193	0.5875	0.5991	0.0205
700	0.6315	0.6399	0.6667	0.6961	0.6284	0.6525	0.0286
800	0.8067	0.7384	0.7453	0.7725	0.7608	0.7647	0.0270
900	0.8185	0.8573	0.7915	0.8311	0.8140	0.8225	0.0242
1000	0.8750	0.9541	0.8771	0.8741	0.8768	0.8914	0.0351
1100	0.9779	0.9778	0.9532	0.9874	0.9717	0.9736	0.0127
1200	1.0663	1.0743	1.0839	1.0717	1.0771	1.0747	0.0065

ตาราง จ.59 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4618	0.4590	0.4401	0.4527	0.4346	0.4496	0.0119
200	0.6203	0.5669	0.6101	0.5686	0.5480	0.5828	0.0309
300	0.6746	0.6807	0.6278	0.6281	0.6296	0.6482	0.0270
400	0.7880	0.8034	0.8096	0.8134	0.8001	0.8029	0.0098
500	0.8501	0.8434	0.8588	0.8573	0.8733	0.8566	0.0112
600	0.9438	0.9530	0.9098	0.9658	0.9310	0.9407	0.0214
700	1.0235	1.0038	1.0232	1.0032	1.0085	1.0124	0.0102
800	1.0875	1.0807	1.0618	1.0594	1.0695	1.0718	0.0121
900	1.0941	1.0869	1.0827	1.0854	1.0904	1.0879	0.0044
1000	1.1226	1.1186	1.1201	1.1282	1.1270	1.1233	0.0042
1100	1.1668	1.1489	1.1618	1.1653	1.1601	1.1606	0.0071
1200	1.2192	1.2254	1.1916	1.2092	1.2070	1.2105	0.0129

ตาราง จ.60 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4281	0.4363	0.4438	0.4284	0.4700	0.4413	0.0173
200	0.4520	0.4439	0.4467	0.4633	0.4502	0.4512	0.0074
300	0.4461	0.4618	0.4699	0.4690	0.4720	0.4638	0.0106
400	0.4870	0.4775	0.4875	0.5099	0.4995	0.4923	0.0126
500	0.4915	0.4996	0.4830	0.4860	0.5075	0.4935	0.0100
600	0.5330	0.4993	0.4960	0.4764	0.4936	0.4997	0.0206
700	0.8933	0.5838	0.5667	0.5486	0.5682	0.6321	0.1465
800	0.7262	0.6441	0.6411	0.6609	0.6435	0.6632	0.0361
900	0.6968	0.6954	0.6942	0.7065	0.7173	0.7020	0.0098
1000	0.7960	0.8043	0.7863	0.7881	0.7924	0.7934	0.0072
1100	0.8637	0.8585	0.8598	0.8467	0.8463	0.8550	0.0080
1200	0.8961	0.8956	0.9050	0.9023	0.9067	0.9011	0.0051

ตาราง จ.61 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5398	0.5058	0.4958	0.4936	0.4538	0.4978	0.0308
200	0.7176	0.7182	0.5954	0.5572	0.5448	0.6266	0.0854
300	0.6705	0.7265	0.7352	0.6787	0.7241	0.7070	0.0300
400	0.9026	0.9248	0.8899	0.8834	0.8958	0.8993	0.015926
500	1.0026	0.9885	0.9929	0.9854	1.0042	0.9947	0.008379
600	1.0715	1.0654	1.0636	1.0531	1.0498	1.0607	0.008996
700	1.1443	1.1591	1.1307	1.1464	1.1522	1.1465	0.010556
800	1.1810	1.2352	1.2194	1.2255	1.2128	1.2148	0.020605
900	1.2531	1.2746	1.2442	1.2362	1.2626	1.2541	0.015099
1000	1.2913	1.2937	1.3046	1.2812	1.2945	1.2931	0.008358
1100	1.3517	1.3042	1.3409	1.3145	1.3315	1.3286	0.019284
1200	1.4011	1.4087	1.4334	1.4021	1.4101	1.4111	0.013087

ตาราง จ.62 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5555	0.5463	0.6349	0.5253	0.5676	0.5659	0.0415
200	0.6290	0.6586	0.6725	0.6745	0.6590	0.6587	0.0182
300	0.8609	0.8445	0.8332	0.8500	0.8442	0.8466	0.0101
400	0.9750	0.9517	0.9645	0.9105	0.9154	0.9434	0.0291
500	1.0656	1.0477	0.9876	0.9992	0.9852	1.0171	0.0371
600	1.0461	1.0890	1.0720	1.0721	1.0651	1.0689	0.0155
700	1.1317	1.1304	1.1121	1.1298	1.1276	1.1263	0.0081
800	1.1634	1.1784	1.1841	1.1606	1.1590	1.1691	0.0114
900	1.2172	1.2106	1.2199	1.2087	1.1965	1.2106	0.0091
1000	1.2562	1.2614	1.2531	1.2792	1.2419	1.2584	0.0137
1100	1.2996	1.3053	1.2736	1.2981	1.2855	1.2924	0.0128
1200	1.3251	1.3500	1.3073	1.3051	1.3061	1.3187	0.0193

ตาราง จ.63 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.6593	0.6514	0.8719	0.7093	0.8738	0.7531	0.1115
200	0.8709	0.7987	0.8730	0.8509	0.8284	0.8444	0.0313
300	0.8912	0.8816	0.9345	0.9048	0.9174	0.9059	0.0210
400	0.9359	1.0049	0.9439	1.0151	0.9909	0.9781	0.0361
500	0.9612	0.9578	1.0165	1.0107	0.9989	0.9890	0.0277
600	1.0097	1.0077	1.0387	1.0416	1.0382	1.0272	0.0169
700	1.0679	1.0610	1.0871	1.0567	1.0695	1.0684	0.0116
800	1.1277	1.1186	1.0988	1.1066	1.1073	1.1118	0.0114
900	1.1235	1.1276	1.1460	1.1308	1.1483	1.1352	0.0112
1000	1.1509	1.1591	1.1752	1.1764	1.1800	1.1683	0.0126
1100	1.1782	1.1941	1.1740	1.1966	1.1800	1.1846	0.0101
1200	1.2245	1.2191	1.2268	1.2230	1.2114	1.2210	0.0060

ตาราง จ.64 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.1960	0.001601748	2.41856E-05
100	200	0.2162	0.001948595	3.57927E-05
100	300	0.2213	0.002040896	3.92635E-05
100	400	0.2214	0.002042741	3.93345E-05
100	500	0.2385	0.002370235	5.29559E-05
100	600	0.2782	0.003227465	9.81778E-05
100	700	0.2838	0.003357814	0.000106267
100	800	0.2904	0.003515416	0.000116474
100	900	0.2919	0.003552337	0.000118933
100	1000	0.2838	0.003357814	0.000106267
100	1100	0.3382	0.004768464	0.000214276
100	1200	0.3532	0.005203617	0.000255156

ตาราง จ.65 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.2941	0.003607099	0.000122628
100	200	0.3119	0.004057184	0.000155131
100	300	0.3161	0.004165138	0.000163495
100	400	0.3164	0.004175167	0.000164283
100	500	0.3229	0.004347501	0.000178121
100	600	0.3255	0.004417303	0.000183885
100	700	0.3266	0.004448869	0.000186522
100	800	0.3283	0.004494237	0.000190345
100	900	0.3284	0.004497525	0.000190623
100	1000	0.3285	0.00449917	0.000190763
100	1100	0.3290	0.004513437	0.000191974
100	1200	0.3299	0.004539284	0.000194179

ตาราง จ.66 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.2984	0.003711906	0.000129856
100	200	0.3190	0.004241977	0.000169581
100	300	0.3238	0.004370706	0.000180027
100	400	0.3587	0.00536527	0.00027125
100	500	0.3590	0.005376055	0.000272342
100	600	0.3655	0.005570213	0.000292362
100	700	0.3664	0.00559832	0.000295319
100	800	0.3684	0.005659665	0.000301824
100	900	0.3687	0.005669511	0.000302875
100	1000	0.3691	0.005681215	0.000304126
100	1100	0.3703	0.00571949	0.000308237
100	1200	0.3706	0.00572815	0.000309171

ตาราง จ.67 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3933	0.006452799	0.000392311
100	200	0.3828	0.006111886	0.000351967
100	300	0.4193	0.007334486	0.000506794
100	400	0.5324	0.011833746	0.001318618
100	500	0.5889	0.014483131	0.001974565
100	600	0.5991	0.014992496	0.002115776
100	700	0.6525	0.017793701	0.002979332
100	800	0.7647	0.02446758	0.005629186
100	900	0.8225	0.028320061	0.007538163
100	1000	0.8914	0.033294319	0.010413017
100	1100	0.9736	0.039759172	0.014838764
100	1200	1.0747	0.048512837	0.022070488

ตาราง จ.68 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.4496	0.008435866	0.000670344
100	200	0.5828	0.014184891	0.001894143
100	300	0.6482	0.01755601	0.002900344
100	400	0.8029	0.026981686	0.006843529
100	500	0.8566	0.030729437	0.008872984
100	600	0.9407	0.037099346	0.012923629
100	700	1.0124	0.043018209	0.017364798
100	800	1.0718	0.048251043	0.021833566
100	900	1.0879	0.049725708	0.023184711
100	1000	1.1233	0.053044066	0.02637256
100	1100	1.1606	0.056657764	0.03007614
100	1200	1.2105	0.061686786	0.03563225

ตาราง จ.69 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.4413	0.008126145	0.000622046
100	200	0.4512	0.00849534	0.000679825
100	300	0.4638	0.008974814	0.000758688
100	400	0.4923	0.010114534	0.000963495
100	500	0.4935	0.01016564	0.00097325
100	600	0.4997	0.010420603	0.001022653
100	700	0.6321	0.016695444	0.002623224
100	800	0.6632	0.018380523	0.003178877
100	900	0.7020	0.020606612	0.003994511
100	1000	0.7934	0.026345485	0.006525069
100	1100	0.8550	0.030615594	0.008807475
100	1200	0.9011	0.034028544	0.010876458

ตาราง จ.70 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.4978	0.010341366	0.001007169
100	200	0.6266	0.016406432	0.002533272
100	300	0.7070	0.020899842	0.004108868
100	400	0.8993	0.03388893	0.01078756
100	500	0.9947	0.041515079	0.016175201
100	600	1.0607	0.047248828	0.020938327
100	700	1.1465	0.05528244	0.028638115
100	800	1.2148	0.062130468	0.036144868
100	900	1.2541	0.06626804	0.041100258
100	1000	1.2931	0.0704951	0.046488831
100	1100	1.3286	0.074468923	0.051854637
100	1200	1.4111	0.084144498	0.066132944

ตาราง จ.71 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5659	0.013374205	0.001683976
100	200	0.6587	0.018134478	0.003094426
100	300	0.8466	0.030011104	0.00846368
100	400	0.9434	0.037317149	0.013075501
100	500	1.0171	0.043414598	0.017685503
100	600	1.0689	0.047986352	0.021595318
100	700	1.1263	0.053332252	0.026659043
100	800	1.1691	0.057500842	0.030974956
100	900	1.2106	0.061697086	0.035644108
100	1000	1.2584	0.066719835	0.04166048
100	1100	1.2924	0.070424496	0.046396123
100	1200	1.3187	0.073356122	0.050322745

ตาราง จ.72 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.7531	0.023727997	0.005294459
100	200	0.8444	0.029855962	0.008376546
100	300	0.9059	0.034391075	0.011108993
100	400	0.9781	0.040133359	0.015118752
100	500	0.9890	0.041037368	0.015805932
100	600	1.0272	0.044289373	0.018403588
100	700	1.0684	0.047948342	0.021561211
100	800	1.1118	0.051954005	0.025302862
100	900	1.1352	0.054188136	0.027518932
100	1000	1.1683	0.057423392	0.030891837
100	1100	1.1846	0.059049039	0.032659743
100	1200	1.2210	0.062771005	0.03689134

ตาราง จ.73 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.2873	0.2808	0.3967	0.3469	0.3209	0.2704	0.0461
200	0.3913	0.3878	0.4155	0.4287	0.3923	0.4031	0.0180
300	0.5554	0.5502	0.4842	0.5084	0.5070	0.5210	0.0306
400	0.6392	0.6437	0.5974	0.5959	0.5780	0.6108	0.0290
500	0.6570	0.6487	0.6244	0.5861	0.6121	0.6257	0.0286
600	0.6838	0.7024	0.6337	0.6589	0.6374	0.6632	0.0296
700	0.7137	0.7053	0.6669	0.6923	0.6966	0.6950	0.0177
800	0.7450	0.7470	0.7340	0.7373	0.7157	0.7358	0.0124
900	0.8054	0.8086	0.8021	0.7927	0.7748	0.7967	0.0136
1000	0.8184	0.8400	0.8276	0.8253	0.7900	0.8203	0.0186
1100	0.8400	0.8352	0.8174	0.8254	0.8166	0.8269	0.0105
1200	0.8781	0.8714	0.8830	0.8800	0.8045	0.8634	0.0332

ตาราง จ.74 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3120	0.2979	0.4027	0.4019	0.3427	0.3514	0.0492
200	0.3988	0.3966	0.4183	0.4084	0.3745	0.3993	0.0163
300	0.4744	0.4727	0.4352	0.4693	0.4564	0.4616	0.0164
400	0.5457	0.5791	0.5267	0.5703	0.5264	0.5496	0.0244
500	0.6181	0.6281	0.5378	0.5216	0.5903	0.5792	0.0476
600	0.6177	0.6319	0.5671	0.5781	0.5642	0.5918	0.0310
700	0.6393	0.6510	0.6213	0.6143	0.6164	0.6285	0.0160
800	0.7097	0.7037	0.6727	0.6820	0.6639	0.6864	0.0197
900	0.7314	0.7319	0.7040	0.7170	0.6909	0.7150	0.0178
1000	0.7211	0.7272	0.6937	0.6891	0.7613	0.7185	0.0291
1100	0.7422	0.7354	0.7331	0.7285	0.6966	0.7272	0.0178
1200	0.7627	0.7905	0.7711	0.8109	0.8055	0.7881	0.0210

ตาราง จ.75 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4920	0.4859	0.5130	0.5127	0.4964	0.5000	0.0123
200	0.5618	0.5814	0.5745	0.5551	0.5349	0.5615	0.0181
300	0.6585	0.6627	0.6548	0.6664	0.6729	0.6631	0.0070
400	0.7287	0.6949	0.7252	0.7379	0.7225	0.7218	0.0161
500	0.7338	0.7359	0.7829	0.7722	0.7120	0.7474	0.0293
600	0.7695	0.7651	0.8144	0.7986	0.7861	0.7867	0.0204
700	0.8098	0.8147	0.8169	0.8243	0.8131	0.8158	0.0054
800	0.8492	0.8386	0.8798	0.8867	0.8480	0.8605	0.0213
900	0.8714	0.8718	0.9042	0.9044	0.8991	0.8902	0.0171
1000	0.8956	0.8934	0.9042	0.9044	0.8991	0.8993	0.0050
1100	0.9182	0.9191	0.9181	0.9234	0.9080	0.9174	0.0057
1200	0.9354	0.9246	0.9658	0.9747	0.9234	0.9448	0.0239

ตาราง จ.76 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5311	0.5435	0.7653	0.7951	0.6620	0.6594	0.1220
200	0.5567	0.5491	0.7461	0.8021	0.6589	0.6626	0.1124
300	0.6520	0.6541	0.7153	0.7265	0.6595	0.6815	0.0363
400	0.7303	0.7223	0.7445	0.7485	0.7476	0.7386	0.0117
500	0.8053	0.8070	0.8152	0.8002	0.7623	0.7980	0.0207
600	0.8780	0.8767	0.8534	0.8339	0.8275	0.8539	0.0234
700	0.8948	0.9034	0.8807	0.8691	0.8718	0.8840	0.0148
800	0.9140	0.9291	0.9363	0.9350	0.9231	0.9275	0.0092
900	0.9838	0.9780	1.0349	1.0267	1.0054	1.0058	0.0252
1000	1.0227	1.0103	1.0333	1.0412	1.0054	1.0226	0.0151
1100	1.0582	1.0546	1.0868	1.0855	1.0531	1.0676	0.0170
1200	1.0823	1.0631	1.1215	1.1154	1.0888	1.0942	0.0241

ตาราง จ.77 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4577	0.4299	0.4839	0.4569	0.4686	0.4594	0.0198
200	0.5636	0.5592	0.5772	0.6089	0.6195	0.5857	0.0271
300	0.6377	0.6343	0.6113	0.6317	0.6397	0.6309	0.0114
400	0.6800	0.7028	0.7023	0.6712	0.6652	0.6843	0.0175
500	0.7413	0.7244	0.7189	0.7170	0.6951	0.7193	0.0166
600	0.8064	0.7393	0.7852	0.7476	0.7474	0.7652	0.0291
700	0.8341	0.8312	0.8265	0.8170	0.8259	0.8269	0.0065
800	0.8609	0.8590	0.8816	0.8809	0.8525	0.8670	0.0134
900	0.9004	0.9007	0.9264	0.9170	0.8946	0.9078	0.0133
1000	0.9491	0.9439	0.9365	0.9352	0.9256	0.9381	0.0090
1100	0.9460	0.9489	0.9618	0.9537	0.9389	0.9499	0.0086
1200	1.0461	1.0489	1.0382	0.9822	0.9856	1.0202	0.0334

ตาราง จ.78 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5210	0.5266	0.5735	0.5142	0.5543	0.5379	0.0251
200	0.7466	0.7377	0.7732	0.7775	0.7519	0.7574	0.0172
300	0.7935	0.7848	0.8344	0.8230	0.8062	0.8084	0.0205
400	0.8244	0.8200	0.8812	0.8428	0.8480	0.8433	0.0243
500	0.8316	0.8338	0.8847	0.8492	0.9261	0.8651	0.0402
600	0.9022	0.8973	0.9756	0.9113	0.9399	0.9253	0.0326
700	0.9624	0.9483	0.9910	0.9556	0.9870	0.9689	0.0191
800	0.9800	0.9780	0.9790	0.9768	0.9834	0.9794	0.0025
900	0.9600	0.9460	0.9995	0.9942	1.0182	0.9836	0.0297
1000	0.9987	1.0046	0.9983	1.0135	1.0290	1.0088	0.0128
1100	1.0233	1.0294	1.0429	1.0183	1.0377	1.0303	0.0101
1200	1.0357	1.0270	1.0398	1.0305	1.0341	1.0334	0.0049

ตาราง จ.79 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5161	0.4922	0.5632	0.5948	0.5544	0.5441	0.0404
200	0.6286	0.6070	0.6999	0.6809	0.6545	0.6542	0.0377
300	0.7207	0.7218	0.7733	0.7683	0.7519	0.7472	0.0250
400	0.8477	0.8411	0.8970	0.8798	0.8632	0.8658	0.022989
500	0.8954	0.9001	0.8609	0.8990	0.8668	0.8844	0.018991
600	0.9940	0.9916	1.0294	1.0223	0.9884	1.0051	0.019175
700	1.0313	1.0247	1.0024	1.0008	1.0133	1.0145	0.013433
800	1.0716	1.0823	1.0839	1.0834	1.0448	1.0732	0.016662
900	1.0758	1.0844	1.1181	1.1336	1.0787	1.0981	0.026084
1000	1.1193	1.1195	1.1072	1.1137	1.1018	1.1123	0.007731
1100	1.1194	1.1382	1.1322	1.1246	1.1104	1.1250	0.010848
1200	1.1795	1.1765	1.1857	1.1838	1.1826	1.1816	0.003642

ตาราง จ.80 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5580	0.5367	0.7577	0.8144	0.5768	0.6487	0.1277
200	0.5690	0.5820	0.7704	0.7463	0.6372	0.6610	0.0929
300	0.6559	0.6165	0.8032	0.7924	0.7152	0.7166	0.0821
400	0.7338	0.7067	0.8217	0.8294	0.7690	0.7721	0.0536
500	0.8091	0.7898	0.8074	0.8078	0.8361	0.8100	0.0166
600	0.8314	0.9057	0.8242	0.8533	0.8521	0.8533	0.0319
700	0.8927	0.8897	0.8787	0.9580	0.9685	0.9175	0.0422
800	0.9208	0.9172	1.0049	1.0039	0.9393	0.9572	0.0439
900	0.9258	0.9543	1.0400	1.0024	0.9467	0.9738	0.0464
1000	0.9383	0.9396	0.9393	1.0640	1.0202	0.9803	0.0585
1100	0.9705	0.9687	1.0389	1.0369	0.9844	0.9999	0.0352
1200	0.9722	0.9745	1.0577	1.0576	0.9844	1.0093	0.0444

ตาราง จ.81 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4159	0.4970	0.7155	0.8544	0.4511	0.5868	0.1896
200	0.5300	0.5412	0.6807	0.7273	0.6136	0.6186	0.0859
300	0.6084	0.6136	0.6803	0.7685	0.7883	0.6918	0.0843
400	0.6689	0.6464	0.7991	0.7959	0.7225	0.7266	0.0704
500	0.7137	0.7121	0.8607	0.8774	0.7935	0.7915	0.0783
600	0.7870	0.7874	0.8879	0.8817	0.8144	0.8317	0.0498
700	0.8246	0.8218	0.8585	0.8745	0.8551	0.8469	0.0229
800	0.8381	0.8300	0.9200	0.9132	0.8950	0.8793	0.0424
900	0.8456	0.8342	0.9363	0.9337	0.8624	0.8824	0.0490
1000	0.8875	0.8776	0.8959	0.9516	0.9495	0.9124	0.0354
1100	0.9148	0.9070	0.9821	0.9725	0.9172	0.9387	0.0356
1200	0.9254	0.9159	0.9805	0.9793	0.9387	0.9480	0.0303

ตาราง จ.82 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.2704	0.003047153	8.7516E-05
100	200	0.4031	0.006778731	0.000432928
100	300	0.5210	0.011333185	0.001209491
100	400	0.6108	0.015587391	0.002286862
100	500	0.6257	0.016355016	0.002517433
100	600	0.6632	0.018384972	0.003180415
100	700	0.6950	0.020191676	0.00383544
100	800	0.7358	0.022643859	0.004822283
100	900	0.7967	0.026566074	0.006634632
100	1000	0.8203	0.028166663	0.007456849
100	1100	0.8269	0.028628124	0.007702789
100	1200	0.8634	0.031223297	0.009159972

ตาราง จ.83 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3514	0.005150675	0.000249992
100	200	0.3993	0.006651393	0.000416821
100	300	0.4616	0.008891282	0.000744638
100	400	0.5496	0.012614192	0.001498151
100	500	0.5792	0.014009774	0.0018477
100	600	0.5918	0.014628467	0.00201436
100	700	0.6285	0.016502136	0.002562885
100	800	0.6864	0.019695693	0.00364953
100	900	0.7150	0.021379606	0.004299445
100	1000	0.7185	0.02158656	0.004382984
100	1100	0.7272	0.022113235	0.004599198
100	1200	0.7881	0.02599448	0.006352607

ตาราง จ.84 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5000	0.010434814	0.001025443
100	200	0.5615	0.013167529	0.00163237
100	300	0.6631	0.018374963	0.003176957
100	400	0.7218	0.021789673	0.004465752
100	500	0.7474	0.023363768	0.005133373
100	600	0.7867	0.02590181	0.006307459
100	700	0.8158	0.027857018	0.007294051
100	800	0.8605	0.031009911	0.009035412
100	900	0.8902	0.033201238	0.010354983
100	1000	0.8993	0.033891962	0.010789487
100	1100	0.9174	0.035271908	0.011684185
100	1200	0.9448	0.037425497	0.013151379

ตาราง จ.85 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6594	0.018172052	0.003107249
100	200	0.6626	0.018348287	0.003167748
100	300	0.6815	0.019413438	0.00354579
100	400	0.7386	0.022819667	0.004897359
100	500	0.7980	0.026651887	0.006677499
100	600	0.8539	0.030536463	0.008762082
100	700	0.8840	0.032736331	0.010067539
100	800	0.9275	0.03606074	0.012211572
100	900	1.0058	0.04244836	0.016908868
100	1000	1.0226	0.043890642	0.018074515
100	1100	1.0676	0.047875984	0.021496359
100	1200	1.0942	0.050310076	0.023731289

ตาราง จ.86 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.4594	0.008806608	0.00073053
100	200	0.5857	0.014326754	0.001932189
100	300	0.6309	0.016632996	0.002603655
100	400	0.6843	0.019574967	0.003604976
100	500	0.7193	0.021638455	0.004404058
100	600	0.7652	0.024495859	0.005642189
100	700	0.8269	0.028629515	0.007703537
100	800	0.8670	0.031484139	0.009313386
100	900	0.9078	0.034537859	0.01120384
100	1000	0.9381	0.03689169	0.012779655
100	1100	0.9499	0.037831623	0.013437746
100	1200	1.0202	0.043685066	0.017906006

ตาราง จ.87 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5379	0.012080905	0.001374236
100	200	0.7574	0.023996995	0.005415021
100	300	0.8084	0.027352957	0.007032869
100	400	0.8433	0.029777835	0.008332836
100	500	0.8651	0.031345566	0.009231726
100	600	0.9253	0.035885717	0.012093556
100	700	0.9689	0.039370409	0.014550629
100	800	0.9794	0.040240834	0.015199653
100	900	0.9836	0.040584079	0.015459465
100	1000	1.0088	0.042708917	0.017116587
100	1100	1.0303	0.044562609	0.018630796
100	1200	1.0334	0.044833207	0.018857177

ตาราง จ.88 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5441	0.012362486	0.001438999
100	200	0.6542	0.017884621	0.003009827
100	300	0.7472	0.023353726	0.005128966
100	400	0.8658	0.031395125	0.009260889
100	500	0.8844	0.03277209	0.010089505
100	600	1.0051	0.042395666	0.016867013
100	700	1.0145	0.043194724	0.01750725
100	800	1.0732	0.048380031	0.021950141
100	900	1.0981	0.05067243	0.02407339
100	1000	1.1123	0.052001157	0.025348678
100	1100	1.1250	0.053202374	0.026529742
100	1200	1.1816	0.058751363	0.032332363

ตาราง จ.89 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6487	0.017586449	0.0029104
100	200	0.6610	0.018259508	0.003137199
100	300	0.7166	0.021475738	0.00433815
100	400	0.7721	0.024944089	0.005850269
100	500	0.8100	0.02746593	0.007090994
100	600	0.8533	0.030496218	0.008739041
100	700	0.9175	0.035284286	0.011692371
100	800	0.9572	0.038423989	0.01386094
100	900	0.9738	0.039778908	0.014853467
100	1000	0.9803	0.040310357	0.0152521
100	1100	0.9999	0.041949967	0.016515059
100	1200	1.0093	0.042748156	0.017147979

ตาราง จ.90 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiCN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5868	0.01438075	0.001946769
100	200	0.6186	0.015984939	0.002404893
100	300	0.6918	0.020009015	0.003766437
100	400	0.7266	0.022076623	0.004583999
100	500	0.7915	0.02621624	0.006461298
100	600	0.8317	0.028960267	0.00788227
100	700	0.8469	0.030035337	0.008477331
100	800	0.8793	0.032387245	0.009854356
100	900	0.8824	0.032623227	0.009998219
100	1000	0.9124	0.034890822	0.011433557
100	1100	0.9387	0.036943944	0.012815809
100	1200	0.9480	0.037679464	0.013330096

ตาราง จ.91 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3206	0.2979	0.3456	0.4446	0.4103	0.3638	0.0617
200	0.3885	0.3831	0.4651	0.4606	0.4136	0.4222	0.0389
300	0.4795	0.4837	0.4741	0.4802	0.4578	0.4751	0.0102
400	0.5571	0.5652	0.5321	0.5375	0.5232	0.5430	0.0176
500	0.5824	0.5740	0.5205	0.5373	0.5625	0.5553	0.0258
600	0.5782	0.5851	0.5348	0.5381	0.5537	0.5580	0.0229
700	0.6286	0.6275	0.5828	0.5886	0.6131	0.6081	0.0215
800	0.6518	0.6710	0.6145	0.6155	0.6058	0.6317	0.0282
900	0.6589	0.7307	0.6422	0.6397	0.6445	0.6632	0.0385
1000	0.6784	0.6879	0.6252	0.6841	0.6410	0.6633	0.0283
1100	0.7165	0.7105	0.7168	0.6969	0.7075	0.7096	0.0082
1200	0.7716	0.7547	0.7195	0.7171	0.7360	0.7398	0.0233

ตาราง จ.92 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3281	0.3637	0.3250	0.2763	0.2822	0.3151	0.0361
200	0.4008	0.3901	0.4191	0.4124	0.4105	0.4066	0.0113
300	0.4726	0.4785	0.4716	0.4829	0.4610	0.4733	0.0083
400	0.5689	0.5779	0.4382	0.4571	0.5207	0.5126	0.0635
500	0.5197	0.6307	0.4937	0.4792	0.4557	0.5158	0.0683
600	0.6179	0.6590	0.5442	0.4878	0.5017	0.5621	0.0741
700	0.6310	0.6787	0.5656	0.5015	0.5045	0.5763	0.0780
800	0.6668	0.6732	0.5904	0.5030	0.5221	0.5911	0.0790
900	0.6802	0.7294	0.5714	0.5913	0.6410	0.6427	0.0645
1000	0.7086	0.7135	0.6593	0.6542	0.6776	0.6826	0.0274
1100	0.7230	0.7426	0.6904	0.6853	0.6887	0.7060	0.0255
1200	0.7393	0.7381	0.6936	0.7082	0.6849	0.7128	0.0251

ตาราง จ.93 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3177	0.2933	0.2561	0.2315	0.2559	0.2709	0.0342
200	0.3002	0.2092	0.2985	0.2909	0.3646	0.2927	0.0553
300	0.3642	0.3719	0.2965	0.3165	0.3103	0.3319	0.0339
400	0.2886	0.4042	0.3588	0.3513	0.3414	0.3489	0.0414
500	0.3768	0.3598	0.4095	0.4078	0.3964	0.3901	0.0214
600	0.4707	0.4549	0.3360	0.3873	0.4711	0.4240	0.0601
700	0.4516	0.4917	0.4074	0.4883	0.4957	0.4669	0.0377
800	0.5135	0.5688	0.4220	0.4154	0.4824	0.4804	0.0643
900	0.5182	0.5428	0.4877	0.4749	0.4489	0.4945	0.0368
1000	0.4696	0.4604	0.5314	0.5140	0.5383	0.5027	0.0357
1100	0.5366	0.4778	0.5421	0.5785	0.5374	0.5345	0.0361
1200	0.6132	0.5227	0.6461	0.5519	0.5147	0.5697	0.0576

ตาราง จ.94 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4380	0.4348	0.5140	0.5787	0.6095	0.5150	0.0796
200	0.4670	0.4574	0.6255	0.6439	0.5406	0.5469	0.0866
300	0.5217	0.5016	0.5989	0.6275	0.6206	0.5741	0.0584
400	0.5838	0.5859	0.6109	0.6275	0.6185	0.6053	0.0196
500	0.6599	0.7052	0.6383	0.6566	0.6556	0.6631	0.0250
600	0.6459	0.6711	0.6873	0.6966	0.6741	0.6750	0.0192
700	0.7431	0.7375	0.6806	0.6970	0.6975	0.7111	0.0275
800	0.7656	0.7734	0.6974	0.7226	0.7185	0.7355	0.0326
900	0.7181	0.7962	0.7280	0.7467	0.7090	0.7396	0.0346
1000	0.8466	0.8245	0.7301	0.7401	0.7422	0.7767	0.0545
1100	0.8495	0.8206	0.8055	0.7729	0.7818	0.8061	0.0308
1200	0.8640	0.8636	0.7957	0.7756	0.7754	0.8149	0.0454

ตาราง จ.95 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4024	0.4185	0.4812	0.5600	0.5932	0.4911	0.0843
200	0.4410	0.4159	0.4892	0.6009	0.5980	0.5090	0.0867
300	0.4244	0.4027	0.4730	0.6440	0.6135	0.5115	0.1105
400	0.4715	0.4431	0.5308	0.6632	0.6030	0.5423	0.0912
500	0.4348	0.4359	0.5115	0.6638	0.7029	0.5498	0.1266
600	0.5052	0.5064	0.5525	0.5631	0.6732	0.5601	0.0685
700	0.5214	0.5017	0.5488	0.6664	0.6948	0.5866	0.0880
800	0.5186	0.5184	0.5660	0.6724	0.6832	0.5917	0.0810
900	0.5314	0.5235	0.6865	0.7224	0.6305	0.6189	0.0897
1000	0.5441	0.5420	0.6380	0.6780	0.7273	0.6259	0.0820
1100	0.5591	0.5717	0.6892	0.6749	0.6680	0.6326	0.0620
1200	0.5947	0.5900	0.6824	0.6941	0.7390	0.6600	0.0653

ตาราง จ.96 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4486	0.4609	0.5029	0.6491	0.6851	0.5493	0.1101
200	0.4285	0.4604	0.5382	0.6920	0.6740	0.5586	0.1205
300	0.4462	0.4512	0.5590	0.6827	0.6878	0.5654	0.1184
400	0.4641	0.4602	0.5245	0.6797	0.7216	0.5700	0.1228
500	0.4811	0.4566	0.5551	0.6885	0.6978	0.5758	0.1131
600	0.5428	0.5285	0.5742	0.6241	0.6660	0.5871	0.0574
700	0.4802	0.4971	0.5763	0.6969	0.7046	0.5910	0.1066
800	0.5294	0.5201	0.5822	0.6641	0.6852	0.5962	0.0758
900	0.6621	0.5438	0.5541	0.6649	0.6684	0.6187	0.0638
1000	0.5219	0.5400	0.6121	0.7096	0.7131	0.6193	0.0905
1100	0.6650	0.5024	0.5995	0.6847	0.7061	0.6315	0.0825
1200	0.5502	0.5846	0.6345	0.7257	0.7131	0.6416	0.0772

ตาราง จ.97 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.5238	0.5221	0.6171	0.7783	0.8161	0.6515	0.1391
200	0.5210	0.5704	0.6481	0.7745	0.8129	0.6654	0.1263
300	0.6204	0.6243	0.6699	0.7542	0.7522	0.6842	0.0659
400	0.6307	0.6325	0.6989	0.7507	0.7562	0.6938	0.061026
500	0.7122	0.7117	0.7333	0.7166	0.7381	0.7224	0.012424
600	0.7746	0.7870	0.7898	0.8188	0.8042	0.7949	0.017016
700	0.8420	0.8443	0.8533	0.8792	0.8702	0.8578	0.016308
800	0.9671	0.9576	0.9204	0.8767	0.9049	0.9253	0.037392
900	0.9969	0.9499	0.9649	0.9491	0.9461	0.9614	0.021155
1000	0.9994	0.9865	0.9900	0.9401	0.9714	0.9775	0.023199
1100	1.0415	1.0559	1.0256	1.0151	1.0163	1.0309	0.017523
1200	1.1634	1.1706	1.1128	1.1182	1.1153	1.1361	0.028423

ตาราง จ.98 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบ ด้วยความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.3940	0.4141	0.4735	0.7693	0.7101	0.5522	0.1749
200	0.4087	0.4289	0.5117	0.6756	0.7527	0.5555	0.1523
300	0.4185	0.4134	0.4978	0.7150	0.7353	0.5560	0.1582
400	0.5462	0.5777	0.5288	0.6333	0.5416	0.5655	0.0419
500	0.5463	0.5290	0.5763	0.6446	0.6750	0.5942	0.0631
600	0.5381	0.5251	0.5829	0.6540	0.6789	0.5958	0.0685
700	0.4618	0.4866	0.6030	0.7371	0.7548	0.6087	0.1363
800	0.4843	0.4964	0.5828	0.7606	0.8918	0.6432	0.1775
900	0.5655	0.5937	0.6167	0.7448	0.7172	0.6476	0.0789
1000	0.5819	0.5875	0.6434	0.7432	0.7237	0.6559	0.0750
1100	0.6252	0.6321	0.6595	0.7326	0.7272	0.6753	0.0515
1200	0.6191	0.6409	0.6947	0.7392	0.7401	0.6868	0.0555

ตาราง จ.99 ผลการวัดรอยสึกหรอของลูกบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Distance [m]	Wear scar diameter [mm]						STDV.
	1	2	3	4	5	Average	
100	0.4995	0.5073	0.5585	0.7619	0.6435	0.5941	0.1099
200	0.5480	0.5256	0.5649	0.7179	0.7056	0.6124	0.0919
300	0.4709	0.4916	0.5988	0.7600	0.7934	0.6229	0.1490
400	0.4709	0.4916	0.5988	0.8600	0.7934	0.6429	0.1762
500	0.5510	0.5845	0.6315	0.7776	0.6950	0.6479	0.0904
600	0.6393	0.6407	0.6639	0.7275	0.7252	0.6793	0.0440
700	0.6285	0.6312	0.6435	0.7602	0.7607	0.6848	0.0693
800	0.6080	0.6192	0.6458	0.7807	0.7922	0.6892	0.0899
900	0.6658	0.6575	0.6716	0.7315	0.7311	0.6915	0.0367
1000	0.6988	0.6928	0.6938	0.7028	0.7043	0.6985	0.0052
1100	0.6676	0.6749	0.6878	0.7315	0.7311	0.6986	0.0307
1200	0.7035	0.7150	0.6822	0.7085	0.7268	0.7072	0.0165

ตาราง จ.100 ปริมาตรการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำต้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3638	0.005519679	0.000287083
100	200	0.4222	0.007435713	0.000520873
100	300	0.4751	0.009418201	0.000835463
100	400	0.5430	0.012311542	0.001427172
100	500	0.5553	0.012877744	0.001561362
100	600	0.5580	0.01300074	0.001591308
100	700	0.6081	0.015448523	0.002246331
100	800	0.6317	0.016674262	0.002616578
100	900	0.6632	0.018382748	0.003179646
100	1000	0.6633	0.018389421	0.003181953
100	1100	0.7096	0.02105677	0.00417073
100	1200	0.7398	0.022890431	0.004927741

ตาราง จ.101 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.3151	0.004138805	0.000161434
100	200	0.4066	0.006895729	0.000447995
100	300	0.4733	0.009349227	0.000823277
100	400	0.5126	0.010966618	0.001132561
100	500	0.5158	0.011105959	0.001161507
100	600	0.5621	0.013194804	0.001639135
100	700	0.5763	0.013868539	0.001810663
100	800	0.5911	0.014593797	0.002004831
100	900	0.6427	0.017258471	0.00280296
100	1000	0.6826	0.019479801	0.003570047
100	1100	0.7060	0.020840555	0.004085617
100	1200	0.7128	0.021246584	0.004246173

ตาราง จ.102 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.2709	0.003059344	8.82175E-05
100	200	0.2927	0.003571358	0.00012021
100	300	0.3319	0.004592863	0.000198788
100	400	0.3489	0.005075264	0.000242727
100	500	0.3901	0.006346162	0.000379456
100	600	0.4240	0.007500042	0.000529921
100	700	0.4669	0.009098504	0.000779734
100	800	0.4804	0.009632271	0.000873853
100	900	0.4945	0.010206121	0.000981013
100	1000	0.5027	0.010549695	0.001048133
100	1100	0.5345	0.011926577	0.001339373
100	1200	0.5697	0.013554825	0.001729733

ตาราง จ.103 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5150	0.011071471	0.001154309
100	200	0.5469	0.012487562	0.001468244
100	300	0.5741	0.013762605	0.001783128
100	400	0.6053	0.015306226	0.002205174
100	500	0.6631	0.018378299	0.003178109
100	600	0.6750	0.019044826	0.003412557
100	700	0.7111	0.021146198	0.00420619
100	800	0.7355	0.022625328	0.004814404
100	900	0.7396	0.02287925	0.004922934
100	1000	0.7767	0.025242148	0.005990716
100	1100	0.8061	0.027195462	0.006952236
100	1200	0.8149	0.027795297	0.007261815

ตาราง จ.104 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.4911	0.010064379	0.000953968
100	200	0.5090	0.010814534	0.001101385
100	300	0.5115	0.010922078	0.001123386
100	400	0.5423	0.012279756	0.001419817
100	500	0.5498	0.012620632	0.00149968
100	600	0.5601	0.013098998	0.001615435
100	700	0.5866	0.014372889	0.001944643
100	800	0.5917	0.014624503	0.002013269
100	900	0.6189	0.01600049	0.002409571
100	1000	0.6259	0.016366551	0.002520982
100	1100	0.6326	0.016719819	0.002630883
100	1200	0.6600	0.018207452	0.003119355

ตาราง จ.105 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5493	0.012599477	0.00149466
100	200	0.5586	0.013030646	0.001598632
100	300	0.5654	0.013348637	0.001677549
100	400	0.5700	0.013569137	0.001733385
100	500	0.5758	0.013847319	0.00180513
100	600	0.5871	0.01439746	0.001951292
100	700	0.5910	0.014589837	0.002003744
100	800	0.5962	0.014847342	0.002075039
100	900	0.6187	0.015990122	0.002406452
100	1000	0.6193	0.016025387	0.002417068
100	1100	0.6315	0.016664734	0.002613592
100	1200	0.6416	0.017202497	0.002784825

ตาราง จ.106 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 50 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.6515	0.017736857	0.002960346
100	200	0.6654	0.018504173	0.003221747
100	300	0.6842	0.019569227	0.003602864
100	400	0.6938	0.020124098	0.003809839
100	500	0.7224	0.021822406	0.004479163
100	600	0.7949	0.026442964	0.006573373
100	700	0.8578	0.030817488	0.008923818
100	800	0.9253	0.03589196	0.012097756
100	900	0.9614	0.03876088	0.014104533
100	1000	0.9775	0.04007885	0.015077804
100	1100	1.0309	0.044611429	0.018671538
100	1200	1.1361	0.054267168	0.027599017

ตาราง จ.107 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 100 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5522	0.01273222	0.001526298
100	200	0.5555	0.012886112	0.00156339
100	300	0.5560	0.012908438	0.001568809
100	400	0.5655	0.013355263	0.001679213
100	500	0.5942	0.014749641	0.002047842
100	600	0.5958	0.014827377	0.002069467
100	700	0.6087	0.015476043	0.002254334
100	800	0.6432	0.017286492	0.002812061
100	900	0.6476	0.017524512	0.002889956
100	1000	0.6559	0.017981275	0.003042414
100	1100	0.6753	0.019062945	0.003419047
100	1200	0.6868	0.019718731	0.003658064

ตาราง จ.108 ปริมาณการสึกหรอของบอล SKD11 ชุบแข็ง เคลือบฟิล์ม TiAlN ที่การทดสอบด้วย
ความเร็ว 150 mm/s และแรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 8 N

Sliding distance [m]	Accumulate [m]	Wear scar width [mm]	h [mm]	Wear volume [mm ³]
100	100	0.5941	0.014744665	0.002046462
100	200	0.6124	0.015667317	0.002310354
100	300	0.6229	0.016212736	0.002473862
100	400	0.6429	0.017273556	0.002807858
100	500	0.6479	0.017542973	0.002896042
100	600	0.6793	0.019290171	0.003500952
100	700	0.6848	0.019604826	0.00361597
100	800	0.6892	0.019856089	0.003709147
100	900	0.6915	0.019990447	0.003759458
100	1000	0.6985	0.020398611	0.003914368
100	1100	0.6986	0.0204033	0.003916166
100	1200	0.7072	0.02091171	0.00411353

เนื่องจากค่าสถิติของการทดสอบ Ball-on-Disk ของกรณีลูกบอล SKD11 ชุบแข็งที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 BA มีค่าสถิติ R^2 มากกว่า 0.90 ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าสมการเส้นตรงที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวที่ระยะทางเริ่มต้นการทดสอบจนถึง 1200 m มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง ผู้วิจัยจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ของวัสดุ SKD11 ชุบแข็ง ด้วยสมการที่ (19) ผลการคำนวณแสดงตาราง จ. 109

ตาราง จ.109 ค่าสึกหรอจำเพาะของวัสดุ SKD11 ชุบแข็ง ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ศึกษา

Normal load [N]	Specific wear rate		
	Sliding velocity [mm/s]		
	50	100	150
2	3.18776E-05	3.11678E-05	1.77216E-05
5	1.64051E-05	1.10203E-05	6.54792E-06
8	1.18215E-05	4.99446E-06	3.54991E-06



ภาคผนวก จ
ผลการทดลองลากชิ้นรูปวัสดุชิ้นงาน

ตาราง ข.1 ผลการวัดค่าความหยาบผิวด้วยชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ที่ผ่านการลาก
ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ SKD 11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
Dry	1	Ra	0.710	0.726	0.725	0.718	0.009
		Rz	4.720	4.640	4.660	4.680	0.042
		Rvk	1.110	1.180	1.190	1.145	0.044
	10	Ra	0.677	0.675	0.669	0.676	0.004
		Rz	4.390	4.350	4.390	4.370	0.023
		Rvk	1.290	1.290	1.280	1.290	0.006
	20	Ra	0.439	0.447	0.450	0.443	0.006
		Rz	2.510	2.950	2.920	2.730	0.246
		Rvk	0.750	0.880	0.890	0.815	0.078
	30	Ra	0.610	0.605	0.606	0.608	0.003
		Rz	4.020	3.960	3.970	3.990	0.032
		Rvk	1.770	1.710	1.800	1.740	0.046
	40	Ra	0.562	0.584	0.590	0.573	0.015
		Rz	3.880	3.840	3.820	3.860	0.031
		Rvk	1.340	1.470	1.510	1.405	0.089
	50	Ra	0.681	0.670	0.681	0.676	0.006
		Rz	3.940	3.900	4.040	3.920	0.072
		Rvk	1.430	1.450	1.460	1.440	0.015
	60	Ra	0.555	0.556	0.554	0.556	0.001
		Rz	3.820	3.850	3.860	3.835	0.021
		Rvk	0.780	0.820	0.840	0.800	0.031
	70	Ra	0.547	0.544	0.539	0.546	0.004
		Rz	3.270	3.320	3.310	3.295	0.026
		Rvk	1.730	1.710	1.680	1.720	0.025

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	80	Ra	0.605	0.607	0.615	0.606	0.005
		Rz	3.410	3.440	3.440	3.425	0.017
		Rvk	1.840	1.820	1.920	1.830	0.053
	90	Ra	0.585	0.616	0.622	0.601	0.020
		Rz	3.420	3.390	3.620	3.405	0.125
		Rvk	2.130	2.070	2.100	2.100	0.030
	100	Ra	0.505	0.479	0.515	0.492	0.019
		Rz	2.740	2.710	3.430	2.725	0.407
		Rvk	0.560	0.520	0.680	0.540	0.083
	110	Ra	0.407	0.397	0.401	0.402	0.005
		Rz	2.320	2.260	2.440	2.290	0.092
		Rvk	0.460	0.510	0.510	0.485	0.029
	120	Ra	0.546	0.543	0.552	0.545	0.005
		Rz	3.810	3.690	3.880	3.750	0.096
		Rvk	2.100	2.000	2.080	2.050	0.053
	128	Ra	0.657	0.656	0.639	0.657	0.010
		Rz	4.150	4.280	4.130	4.215	0.081
		Rvk	1.630	1.580	1.410	1.605	0.115
	130	Ra	0.560	0.559	0.574	0.560	0.008
		Rz	3.880	3.890	3.840	3.885	0.026
		Rvk	1.370	1.350	1.270	1.360	0.053
	135	Ra	0.482	0.487	0.483	0.485	0.003
		Rz	3.480	3.340	3.310	3.410	0.091
		Rvk	1.590	1.700	1.720	1.645	0.070

ตาราง ข.2 ผลการวัดค่าความหยาบผิวด้วยชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ที่ผ่านการลาก
ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ SKD 11 ชุบแข็งภายใต้สภาวะใช้สารหล่อลื่น

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
Oil	1	Ra	0.494	0.488	0.490	0.491	0.003
		Rz	3.300	3.270	3.290	3.285	0.015
		Rvk	1.020	1.150	1.280	1.085	0.130
	50	Ra	0.566	0.513	0.508	0.540	0.032
		Rz	3.150	3.370	3.180	3.260	0.119
		Rvk	2.200	1.570	1.580	1.885	0.361
	100	Ra	0.562	0.582	0.580	0.572	0.011
		Rz	4.010	4.010	3.750	4.010	0.150
		Rvk	1.660	1.720	1.770	1.690	0.055
	150	Ra	0.519	0.520	0.522	0.520	0.002
		Rz	3.440	3.360	3.370	3.400	0.044
		Rvk	1.390	1.470	1.480	1.430	0.049
	200	Ra	0.466	0.494	0.487	0.480	0.015
		Rz	2.390	2.240	2.390	2.315	0.087
		Rvk	0.520	0.540	0.570	0.530	0.025
	250	Ra	0.500	0.494	0.491	0.497	0.005
		Rz	3.500	3.150	3.050	3.325	0.236
		Rvk	1.560	1.370	1.350	1.465	0.116
	300	Ra	0.493	0.495	0.497	0.494	0.002
		Rz	3.760	3.800	3.800	3.780	0.023
		Rvk	1.100	1.030	1.040	1.065	0.038
	350	Ra	0.408	0.422	0.398	0.415	0.012
		Rz	2.140	3.170	2.210	2.655	0.576
		Rvk	0.510	0.660	0.500	0.585	0.090

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	400	Ra	0.516	0.528	0.528	0.522	0.007
		Rz	3.090	3.320	3.400	3.205	0.161
		Rvk	1.660	1.680	1.690	1.670	0.015
	450	Ra	0.452	0.447	0.454	0.450	0.004
		Rz	3.670	3.040	3.440	3.355	0.319
		Rvk	1.110	1.120	1.130	1.115	0.010
	500	Ra	0.445	0.446	0.450	0.446	0.003
		Rz	2.600	2.620	2.780	2.610	0.099
		Rvk	1.000	1.010	1.050	1.005	0.026
	550	Ra	0.471	0.470	0.451	0.471	0.011
		Rz	2.890	2.920	2.710	2.905	0.114
		Rvk	1.100	1.110	0.760	1.105	0.199
	600	Ra	0.513	0.508	0.511	0.511	0.003
		Rz	3.520	3.700	3.830	3.610	0.156
		Rvk	1.250	1.180	1.210	1.215	0.035
	650	Ra	0.485	0.484	0.474	0.485	0.006
		Rz	3.270	3.340	3.240	3.305	0.051
		Rvk	0.560	0.570	0.590	0.565	0.015
	700	Ra	0.475	0.452	0.474	0.464	0.013
		Rz	3.610	2.990	3.710	3.300	0.390
		Rvk	1.520	1.510	1.570	1.515	0.032
	750	Ra	0.447	0.534	0.483	0.491	0.044
		Rz	2.640	2.650	2.630	2.645	0.010
		Rvk	0.620	1.020	0.730	0.820	0.207
	800	Ra	0.557	0.559	0.556	0.558	0.002
		Rz	3.720	3.670	3.710	3.695	0.026
		Rvk	2.390	2.400	2.370	2.395	0.015

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	850	Ra	0.572	0.529	0.510	0.551	0.032
		Rz	3.610	3.450	3.330	3.530	0.140
		Rvk	1.620	1.310	1.310	1.465	0.179
	900	Ra	0.612	0.582	0.588	0.597	0.016
		Rz	3.610	3.530	3.660	3.570	0.066
		Rvk	1.510	1.400	1.420	1.455	0.059
	950	Ra	0.586	0.582	0.614	0.584	0.017
		Rz	3.670	3.450	3.980	3.560	0.266
		Rvk	1.610	1.500	1.410	1.555	0.100
	1000	Ra	0.571	0.585	0.580	0.578	0.007
		Rz	3.560	3.710	3.740	3.635	0.096
		Rvk	0.930	1.040	1.030	0.985	0.061
	1050	Ra	0.582	0.581	0.579	0.582	0.002
		Rz	3.920	3.710	3.790	3.815	0.106
		Rvk	1.460	1.470	1.580	1.465	0.067
	1100	Ra	0.567	0.566	0.570	0.567	0.002
		Rz	4.210	3.880	3.900	4.045	0.185
		Rvk	1.750	1.700	1.740	1.725	0.026
	1150	Ra	0.582	0.587	0.588	0.585	0.003
		Rz	4.260	4.150	4.170	4.205	0.059
		Rvk	3.250	3.520	3.350	3.385	0.137
	1200	Ra	0.580	0.591	0.582	0.586	0.006
		Rz	3.500	3.620	3.730	3.560	0.115
		Rvk	3.710	3.520	3.510	3.615	0.113
	1250	Ra	0.497	0.498	0.500	0.498	0.002
		Rz	3.020	3.030	3.130	3.025	0.061
		Rvk	3.130	3.170	3.150	3.150	0.020

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	1300	Ra	0.536	0.524	0.522	0.530	0.008
		Rz	3.210	3.290	3.310	3.250	0.053
		Rvk	3.100	3.080	3.070	3.090	0.015
	1350	Ra	0.633	0.605	0.629	0.619	0.015
		Rz	3.960	3.830	3.930	3.895	0.068
		Rvk	2.960	2.880	2.970	2.920	0.049
	1400	Ra	0.663	0.633	0.628	0.648	0.019
		Rz	3.940	4.070	3.660	4.005	0.210
		Rvk	3.410	3.650	3.620	3.530	0.131
	1450	Ra	0.580	0.566	0.565	0.573	0.008
		Rz	3.600	3.440	3.550	3.520	0.082
		Rvk	1.990	2.150	2.240	2.070	0.127
	1500	Ra	0.586	0.566	0.573	0.576	0.010
		Rz	3.710	3.850	3.840	3.780	0.078
		Rvk	2.290	2.360	2.430	2.325	0.070

ตาราง ข.3 ผลการวัดค่าความหยาบผิวด้วยชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 BA ที่ผ่านการลาก
ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ SKD 11 ชุบแข็งภายใต้เคลือบฟิล์ม DLC ได้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น

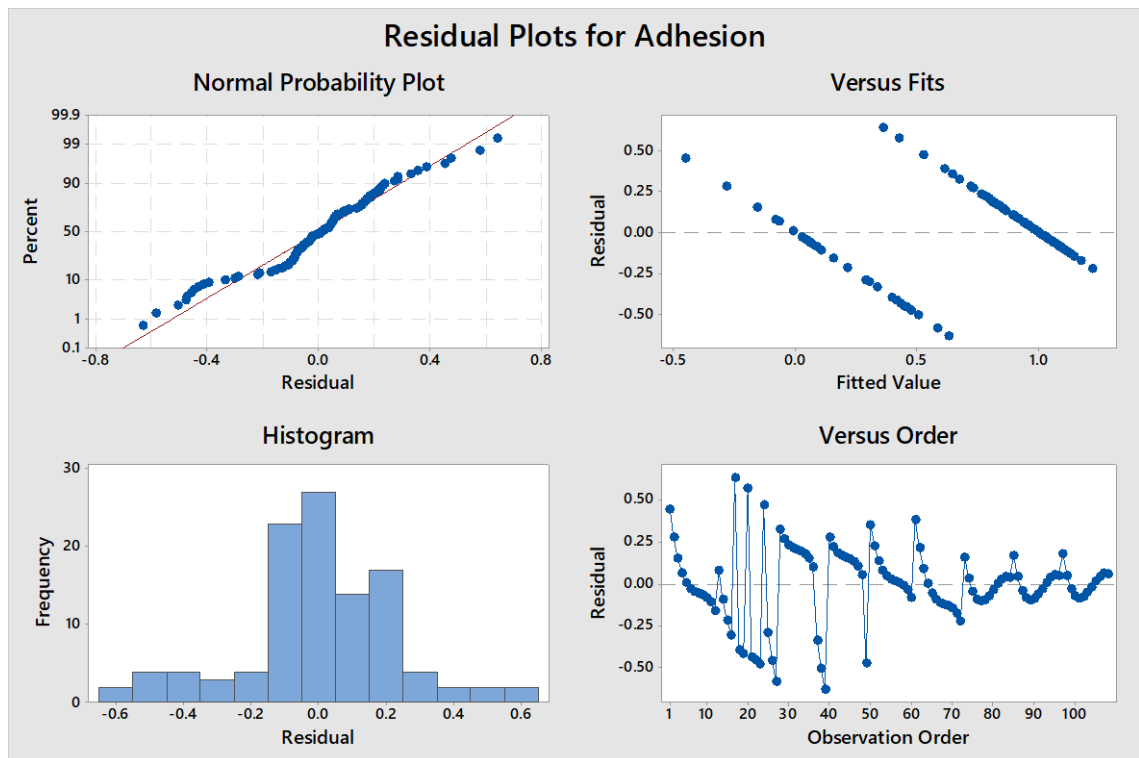
Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
Dry	1	Ra	0.610	0.612	0.602	0.611	0.005
		Rz	3.930	3.900	3.840	3.915	0.046
		Rvk	1.820	1.960	1.720	1.890	0.121
	50	Ra	0.589	0.576	0.597	0.583	0.011
		Rz	4.390	4.360	4.370	4.375	0.015
		Rvk	3.040	3.120	3.130	3.080	0.049
	100	Ra	0.593	0.593	0.600	0.593	0.004
		Rz	4.080	3.960	4.150	4.020	0.096
		Rvk	3.200	2.950	3.160	3.075	0.134
	150	Ra	0.610	0.613	0.613	0.612	0.002
		Rz	3.930	3.900	3.930	3.915	0.017
		Rvk	3.550	3.540	3.610	3.545	0.038
	200	Ra	0.613	0.575	0.576	0.594	0.022
		Rz	3.950	3.790	3.890	3.870	0.081
		Rvk	3.000	3.390	3.290	3.195	0.203
	250	Ra	0.573	0.576	0.559	0.575	0.009
		Rz	3.710	3.700	3.770	3.705	0.038
		Rvk	1.420	1.420	1.440	1.420	0.012
	300	Ra	0.555	0.557	0.542	0.556	0.008
		Rz	3.990	3.850	3.930	3.920	0.070
		Rvk	1.310	1.320	1.420	1.315	0.061
	350	Ra	0.613	0.577	0.578	0.595	0.021
		Rz	3.990	3.960	4.060	3.975	0.051
		Rvk	1.520	1.420	1.440	1.470	0.053

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	400	Ra	0.587	0.627	0.634	0.607	0.025
		Rz	3.980	3.960	3.980	3.970	0.012
		Rvk	1.450	1.820	1.880	1.635	0.233
	450	Ra	0.530	0.578	0.547	0.554	0.024
		Rz	4.100	4.180	4.130	4.140	0.040
		Rvk	1.180	1.120	1.210	1.150	0.046
	500	Ra	0.559	0.554	0.563	0.557	0.005
		Rz	3.650	3.720	3.730	3.685	0.044
		Rvk	1.510	1.590	1.600	1.550	0.049
	550	Ra	0.532	0.509	0.500	0.521	0.017
		Rz	3.920	3.940	3.910	3.930	0.015
		Rvk	1.570	1.280	1.300	1.425	0.162
	600	Ra	0.607	0.609	0.619	0.608	0.006
		Rz	3.750	3.830	3.730	3.790	0.053
		Rvk	2.010	2.120	1.830	2.065	0.146
	650	Ra	0.624	0.629	0.631	0.627	0.004
		Rz	4.120	4.090	4.130	4.105	0.021
		Rvk	1.650	1.640	1.640	1.645	0.006
	700	Ra	0.551	0.548	0.545	0.550	0.003
		Rz	4.000	3.930	3.870	3.965	0.065
		Rvk	1.110	1.090	1.130	1.100	0.020
	750	Ra	0.604	0.564	0.565	0.584	0.023
		Rz	3.820	3.980	3.990	3.900	0.095
		Rvk	1.850	1.400	1.410	1.625	0.257
	800	Ra	0.550	0.542	0.536	0.546	0.007
		Rz	3.650	3.600	3.580	3.625	0.036
		Rvk	1.230	1.280	1.270	1.255	0.026

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	850	Ra	0.462	0.458	0.455	0.460	0.004
		Rz	2.650	2.820	2.640	2.735	0.101
		Rvk	0.570	0.610	0.540	0.590	0.035
	900	Ra	0.450	0.447	0.449	0.449	0.002
		Rz	2.740	2.640	2.780	2.690	0.072
		Rvk	0.790	0.820	0.870	0.805	0.040
	950	Ra	0.421	0.419	0.418	0.420	0.002
		Rz	2.780	2.630	2.610	2.705	0.093
		Rvk	0.560	0.550	0.560	0.555	0.006
	1000	Ra	0.431	0.430	0.435	0.431	0.003
		Rz	2.600	2.600	2.610	2.600	0.006
		Rvk	0.550	0.550	0.550	0.550	0.000
	1050	Ra	0.460	0.464	0.465	0.462	0.003
		Rz	3.920	3.930	3.910	3.925	0.010
		Rvk	0.950	0.930	0.910	0.940	0.020
	1100	Ra	0.481	0.481	0.482	0.481	0.001
		Rz	3.860	3.860	3.840	3.860	0.012
		Rvk	0.810	0.830	0.820	0.820	0.010
	1150	Ra	0.454	0.448	0.454	0.451	0.003
		Rz	2.680	2.740	2.650	2.710	0.046
		Rvk	0.680	0.640	0.700	0.660	0.031
	1200	Ra	0.506	0.509	0.506	0.508	0.002
		Rz	3.640	3.650	3.610	3.645	0.021
		Rvk	1.300	1.260	1.230	1.280	0.035
	1250	Ra	0.463	0.474	0.467	0.469	0.006
		Rz	3.380	3.420	3.360	3.400	0.031
		Rvk	0.780	0.760	0.790	0.770	0.015

Lubrication	No. Cup	Parameter	Surface roughness (μm)				
			1	2	3	Average	STDEV.
	1300	Ra	0.445	0.448	0.448	0.447	0.002
		Rz	3.530	3.610	2.630	3.570	0.544
		Rvk	0.700	0.700	0.640	0.700	0.035
	1350	Ra	0.464	0.465	0.466	0.465	0.001
		Rz	2.550	2.670	2.580	2.610	0.062
		Rvk	0.660	0.650	0.690	0.655	0.021
	1400	Ra	0.503	0.490	0.486	0.497	0.009
		Rz	3.860	3.590	3.570	3.725	0.162
		Rvk	0.870	0.910	0.920	0.890	0.026
	1450	Ra	0.501	0.500	0.504	0.501	0.002
		Rz	3.130	3.080	3.220	3.105	0.071
		Rvk	1.800	1.760	1.680	1.780	0.061
	1500	Ra	0.470	0.449	0.441	0.460	0.015
		Rz	2.620	2.520	2.470	2.570	0.076
		Rvk	0.640	0.530	0.510	0.585	0.070





Correlation: Contact pressure [MPa], Sliding speed ... ce [m], Adhesion

Correlations

	Contact pressure	Sliding speed [m	Sliding distance
Sliding speed [m	0.000		
	1.000		
Sliding distance	0.000	0.000	
	1.000	1.000	
Adhesion	0.646	0.311	0.233
	0.000	0.001	0.015

Cell Contents

Pearson correlation
P-Value

Stepwise Selection of Terms

Candidate terms: Contact pressure [MPa], Sliding speed [mm/s], Sliding distance [m], Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa], Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa]

	-----Step 1-----		-----Step 2-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	-2.604		-3.271	
Contact pressure [MPa]	0.002909	0.000	0.002909	0.000
Sliding speed [mm/s]			0.00667	0.000
Sliding distance [m]				
Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa]				
S	0.675294		0.619818	
R-sq	41.74%		51.38%	
R-sq(adj)	41.19%		50.45%	
R-sq(pred)	39.33%		48.50%	
	-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	-3.655		-9.46	
Contact pressure [MPa]	0.002909	0.000	0.01454	0.002
Sliding speed [mm/s]	0.00667	0.000	0.00667	0.000
Sliding distance [m]	0.000591	0.000	0.000591	0.000
Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa]			-0.000006	0.013
S	0.587124		0.572291	
R-sq	56.79%		59.34%	
R-sq(adj)	55.54%		57.76%	
R-sq(pred)	53.31%		55.24%	

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	49.229	12.3072	37.58	0.000
Contact pressure [MPa]	1	3.294	3.2944	10.06	0.002
Sliding speed [mm/s]	1	8.000	8.0000	24.43	0.000
Sliding distance [m]	1	4.488	4.4880	13.70	0.000
Contact pressure [MPa]*Contact pressure [MPa]	1	2.116	2.1161	6.46	0.013
Error	103	33.734	0.3275		
Total	107	82.963			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐชานันท์ อังสุเศรษฐี
วัน เดือน ปี เกิด	11 สิงหาคม 2518
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	2009 Master of Engineering Program in Engineering Management (International Program) Faculty of Engineering, Kasetsart University 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต 1994 Grade 12, Francis Lewis High School, New York, USA.
ที่อยู่ปัจจุบัน	807/21 หมู่ 8 (หมู่บ้านภูมิรินทร์-ข้างเขี้ยวรังสิต) ถ.พหลโยธิน 72 ต.คูคต อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12130
ผลงานตีพิมพ์	N. Angsuseranee, B. Watcharasresomroeng P. Bunyawanichakul and S.Chartniyom, (2020). "Tribological Behavior of Tool Steel Substrate and Solid Films against 304 BA Austenitic Stainless Steel under Dry Sliding", Advances in Tribology, Vol. 2020, Article ID 8845548, 11 pages. https://doi.org/10.1155/2020/8845548 N. Angsuseranee, B. Watcharasresomroeng P. Bunyawanichakul and S.Chartniyom, (2020). "Tribological Effects in deep drawing operation of SUS304 BA stainless steel sheet", International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, Vol. 10 (3), pp 6219-6230. Natchanun Angsuseranee, Ganwarich Pluphrach, Bhadpiroon Watcharasresomroeng and Arkhom Songkroh, "Springback and sidewall-curl prediction in U-bending process of AHSS through finite element method and artificial neural network approach", Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol.40 (3), (2018), pp. 534-539.

