

พฤติกรรมการศึกษาของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยเทคนิคพินออนดิสก์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตที่ส่งมาขอรับปริญญาบัตรที่สำนักงานวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

WEAR BEHAVIOR OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITE BY PIN-ON-DISK TECHNIQUE

Mr. Witsarut Penglao

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยเทคนิคพินออนดิสก์
โดย	นายวิศรุต เฟ็งเลา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นาย จักรกฤษ สุภาวสุทธิ์)

วิศรุต เพ็งเลา : พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยเทคนิคพินออนดิสก์. (WEAR BEHAVIOR OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITE BY PIN-ON-DISK TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์, 97 หน้า.

ในงานวิจัยนี้เราจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการขัดสีระหว่างวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับวัสดุใบตัดเพชรที่มีนิกเกิลเป็นตัวประสาน ทำการทดสอบการสึกหรอโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ สภาวะทดสอบการสึกหรอที่ใช้มีดังนี้ ความเร็วไถลเชิงเส้น 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10, 15 และ 20 นิวตัน ระยะทางไถลมากที่สุดที่ 5000 เมตร และมีของเหลวในระบบเป็นสารหล่อเย็น Rustlick G-25J พิจารณาผลของการขัดสีที่เกิดขึ้นในเทอมของ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, มวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน, อัตราการสึกหรอจำเพาะ, ความหยาบผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน และลักษณะสัญญาณและโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของคู่ผิวสัมผัสนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.151 ถึง 0.347 โดยขึ้นกับหลายปัจจัยอย่างเช่น การเพิ่มขึ้นของความเร็วไถลเชิงเส้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง และยังส่งผลในเทอมของอัตราการสึกหรอจำเพาะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน และพบว่าการลดลงของอัตราการสึกหรอจำเพาะเมื่อระยะทางไถลที่ผ่านไปเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อผ่านไป 1000 เมตร อัตราการสึกหรอจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 345×10^{-6} ถึง 518×10^{-6} mm^3/Nm จากนั้นเมื่อผ่านไป 5000 เมตร ค่าลดลงมาอยู่ในช่วง 100×10^{-6} ถึง 170×10^{-6} mm^3/Nm แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของการขัดสีระหว่างวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับใบตัดเพชรลดลงจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางไถล และพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ยังแสดงให้เห็นในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความหยาบผิวของผิวหน้าร่องการสึกหรอเมื่อระยะทางไถลเปลี่ยนแปลงไป และลักษณะทางสัญญาณของร่องการสึกหรอจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังจะเห็นได้จากช่วงระยะทางไถล 3000 ถึง 5000 เมตรที่มีความรุนแรงของการขัดสีน้อย ผิวหน้าของร่องการสึกหรอที่ได้จะมีความเรียบที่มากกว่า และสามารถสังเกตเห็นร่องรอยของการหลุดออกของเกรนได้น้อยกว่า ช่วงระยะทางไถล 1000 เมตร ที่มีการขัดสีที่รุนแรง ยังได้ตรวจพบลักษณะของการผลัดผิวใหม่เองของผิวหน้าใบตัดเพชร จากพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของความหยาบผิวหน้าใบตัดเพชรในระหว่างการขัดสีกับวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์อีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370341121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: WEAR / ALUMINA-TITANIUM CARBIDE / DIAMOND BLADE / PIN-ON-DISK

WITSARUT PENGLAO: WEAR BEHAVIOR OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITE BY PIN-ON-DISK TECHNIQUE. ADVISOR: ASST. PROF. TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., CO-ADVISOR: BOONRAT LOHWONGWATANA, Ph.D., 97 pp.

This research studies wear behavior of alumina-titanium carbide (AlTiC) ceramic matrix composite, when rubbing against diamond wheel having nickel alloy bond. Wear behavior is tested by using a pin-on-disk method. Testing condition are: linear sliding velocity of 0.2, 0.3, and 0.4 m/s, load of 10, 15, and 20 newton, maximum sliding distant of 5000 m. Lubrication during sliding is commercial coolant, Rustlick G-25J. Research results are coefficient of friction, mass loss, specific wear rate, change of roughness value, and morphology, microstructure of worn surfaces. From the study, it was found that coefficient of friction is in between 0.151 and 0.347. The values vary depending on many factors: increase of sliding velocity decrease coefficient of friction, as well as specific wear rate. The specific wear rates are in range of 345×10^{-6} to 518×10^{-6} mm^3/Nm , during the first 1000 m. Between 1000 to 5000 m, the specific wear rates are in rage of 100×10^{-6} to 170×10^{-6} mm^3/Nm . This shows that severity of abrasion between the AlTiC and diamond wheel is reduced, as sliding distant increases. Change of wear behavior is also observed from change of roughness value of sliding surfaces. Roughness value of worn AlTiC is small, when sliding distance is between 3000 to 5000 m. During the first 1000 m, roughness is high, and some grain pull-outs are observed. In addition, wear of diamond blade shows change of its surface as self-dressing, and change of its roughness.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของที่อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำชัช เหลืองวรานันท์ และอาจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์ ที่กรุณาอบรมให้ความรู้ ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นและสร้างเสริมประสบการณ์ในการทำงานอันมีค่ายิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ฌ อยุธยา และ นายจักรกฤษ สุภาวสุทธิ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณแผนก Slider Fabrication Development บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย สัญญาเลขที่ MDS56I0021

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ, ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบตลอดมาจนสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับพระคุณอันล้นพ้นสำหรับโอกาสในการศึกษา กำลังใจและกำลังสนับสนุนที่ตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือ.....	4
2.1.1.2 ขั้นตอนทดสอบและการเตรียม	5
2.1.1.3 ตัวแปรในการทดสอบ.....	6
2.1.1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	6
2.1.1.5 การคำนวณและรายงานผล	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	20
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง	20
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	20
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 วิธีการทดลอง	22
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	22
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอ.....	23
3.2.3 ขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์	23
3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์การทดลอง.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25

4.1 ผลของการขัดสีระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานพินกับหินอะลูมินาก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอ.....	25
4.1.1 ผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานพิน.....	25
4.1.2 ผลกระทบที่มีต่อค่าความหยาบผิวของผิวหน้าชิ้นงานพิน.....	28
4.2 ผลของการขัดสีระหว่างใบตัดเพชรและวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	29
4.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	29
4.2.2 มวลของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป.....	38
4.2.3 อัตราการสึกหรอหรืออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ.....	41
4.2.4 ความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป.....	43
4.2.5 โครงสร้างจุลภาคและลักษณะทางสัณฐานของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอ.....	47
4.2.5.1 ผิวหน้าของใบตัดเพชร.....	48
4.2.5.2 ผิวหน้าของแผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	51
4.2.6 ผลกระทบที่มีต่อเศษวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอ.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	เอกลักษณ์ของชิ้นงานทดสอบการสึกหรอที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ.....	6
ตารางที่ 2.2	แสดงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุอะลูมินาโดยทั่วไป.....	10
ตารางที่ 2.3	แสดงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยทั่วไป.....	11
ตารางที่ 2.4	แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	17
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุผสม $Al_2O_3/TiC/CaF_2$	18
ตารางที่ 4.1	ค่าร้อยละโดยอะตอมของธาตุองค์ประกอบที่ตรวจสอบก่อนและหลังทำการ เปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด.....	27
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าทางสถิติของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวหน้าชิ้นงานพินก่อนและ หลังขัดสีกับหินอะลูมินา.....	29
ตารางที่ 4.3	ค่าความชันของเส้นเชื่อมจุดค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของแต่ละสภาวะ ทดสอบการสึกหรอ จากแผนภูมิในรูปที่ 4.10.....	43
ตารางที่ ผ.1	ขนาดของเม็ดเพชรที่วัดจากภาพถ่ายผิวหน้าใบตัดด้วย SEM ในโหมด back scatter electron.....	61
ตารางที่ ผ.2	ค่าทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแต่ละสภาวะการทดสอบ	62
ตารางที่ ผ.3	ค่าความชันของเส้นแนวโน้มจากแผนภูมิค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรูปที่ 4.10.....	64
ตารางที่ ผ.4	ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานพินหลังจากทดสอบการสึกหรอแล้ว...	64
ตารางที่ ผ.5	ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไป, ปริมาตรการสึกหรอ และอัตราการสึกหรอจำเพาะ ของชิ้นงานดีสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอ.....	67
ตารางที่ ผ.6	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของแผ่นอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ก่อนทดสอบการ สึกหรอ.....	69
ตารางที่ ผ.7	ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานพิน.....	70
ตารางที่ ผ.8	ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานพิน....	72
ตารางที่ ผ.9	ความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดลิบจุดของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานพิน.	74
ตารางที่ ผ.10	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการสึกหรอของ ร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดีสก์ที่สภาวะการทดสอบการสึกหรอต่างๆ....	76
ตารางที่ ผ.11	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการสึก หรอของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดีสก์ที่สภาวะการทดสอบการสึก หรอต่างๆ.....	78
ตารางที่ ผ.12	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดลิบจุดที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการ สึกหรอของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดีสก์ที่สภาวะการทดสอบการสึก หรอต่างๆ.....	80

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ภาพตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอบแบบพินออนดิสก์	4
ภาพที่ 2.2	ภาพวาดของระบบการทดสอบการสึกหรอบแบบพินออนดิสก์	5
ภาพที่ 2.3	แผนภูมิเฟสสมดุลของระบบ $Al_2O_3-SiO_2-MgO$	9
ภาพที่ 2.4	โครงสร้างผลึกแบบคอร์นดัมของวัสดุอะลูมินา	10
ภาพที่ 2.5	โครงสร้างผลึกแบบ rocksalt ที่มีอะตอม C อยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และอะตอม Ti อยู่ที่ตำแหน่ง 1/2,1/2,1/2	11
ภาพที่ 2.6	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกเนื้อเดียวกับวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกที่เสริมแรงด้วยผงอนุภาคและแบบเส้นใย	13
ภาพที่ 2.7	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุอะลูมินาเนื้อเดียวกับวัสดุผสมอะลูมินาเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์	13
ภาพที่ 2.8	แผนภาพแสดงขั้นตอนกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกด้วยเทคนิคการใช้สเลอรี	14
ภาพที่ 2.9	ภาพวาดกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกด้วยวิธีแทรกซึมทางเคมี (a) แบบอุณหภูมิคงที่, (b) แบบ thermal gradient, (c)แบบ pressure gradient	
ภาพที่ 2.10	ภาพวาดของกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกด้วยวิธีแลนโซด์	15
ภาพที่ 2.11	แสดงค่าความหยาบผิวและแผนที่แรงเสียดทานสำหรับ Al_2O_3-TiC (70:30 wt%) ที่แรงกระทำ 166 นาโนนิวตัน	15
ภาพที่ 2.12	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาตรการสึกหรอกับระยะทางไถล (b) สัมประสิทธิ์การสึกหรอกับระยะทางการไถล (c) ความดันกับระยะทางไถล (d) อัตราการสึกหรอกับความดัน	16
ภาพที่ 2.13	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความเร็วยรอบการหมุนของวัสดุผสมที่ไถลกับ (a) แหวนคาร์ไบด์และ (b) แหวนเหล็กกล้า	18
ภาพที่ 2.14	ภาพจาก SEM ของผิวหน้าที่สึกหรอของวัสดุ Al_2O_3/TiC ที่ไม่ได้เติม CaF_2	19
ภาพที่ 3.1	วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ โดยในรูป a) ใบมีดตัด SD1200, b) แผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์, c) แท่งเหล็กกล้าไร้สนิม, d) อีพอกซี เรซิน, e) หินอะลูมินา, f) สารหล่อเย็น	19
ภาพที่ 3.2	เครื่องทดสอบการสึกหรอบแบบพินออกดิสก์ ยี่ห้อ Plint รุ่น TE 79	21
ภาพที่ 3.3	เครื่องมือพิสูจน์เอกลักษณ์ชนิดต่างๆที่ใช้ได้แก่ a) เครื่องชั่งน้ำหนัก, b) กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง, c) เครื่องวัดความหยาบผิว, d) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ e) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	22
ภาพที่ 3.4	ชิ้นงานสำหรับทดสอบการสึกหรอ (a) ชิ้นงานพินหลังจากติดใบตัดเรียบร้อยแล้ว, (b) แผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่ตัดแล้ว และวางอยู่บนแผ่นรองชิ้นงานดิสก์	23
ภาพที่ 4.1	ภาพโครงสร้างจุลภาพของผิวหน้าใบตัดเพชรที่อยู่บนชิ้นงานพินซึ่ง ก) ยังไม่	

	ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด ข) ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดแล้ว ภายใต้สภาวะที่กำหนด ทั้งสองรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า	25
ภาพที่ 4.2	ผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของใบมีดตัดก่อนการเปิดคมผิว ก) ภาพถ่าย SEM ในโหมด back scatter electron, ข) บริเวณที่มีธาตุ C อยู่, ค) บริเวณที่มีธาตุ Ni อยู่ และ ง) แผนภูมิแสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบใน บริเวณที่ตรวจสอบนี้	26
ภาพที่ 4.3	ผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของใบมีดตัดหลังการเปิดคมผิว ก) ภาพถ่าย SEM ในโหมด back scatter electron, ข) บริเวณที่มีธาตุ C อยู่, ค) บริเวณที่ มีธาตุ Ni อยู่ และ ง) แผนภูมิแสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบในบริเวณที่ ตรวจสอบนี้	27
ภาพที่ 4.4	แสดงค่าความหยาบผิวหน้าของใบตัดก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิว ใบตัด	28
ภาพที่ 4.5	ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนผิวหน้าของใบตัด a) ก่อน และ b) หลัง ทำการ เปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด	28
ภาพที่ 4.6	แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสึกหรอโดย ใช้ความเร็วไกลเชิงเส้นที่ 0.2m/s และระยะทางไกลผ่านไป 5000m โดยที่แรง กดที่ให้เป็น ก) 10N, ข) 15N และ ค) 20N ตามลำดับ	31
ภาพที่ 4.7	แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสึกหรอโดย ใช้ความเร็วไกลเชิงเส้นที่ 0.3m/s และระยะทางไกลผ่านไป 5000m โดยที่แรง กดที่ให้เป็น ก) 10N, ข) 15N และ ค) 20N ตามลำดับ	32
ภาพที่ 4.8	แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสึกหรอโดย ใช้ความเร็วไกลเชิงเส้นที่ 0.4m/s และระยะทางไกลผ่านไป 5000m โดยที่แรง กดที่ให้เป็น ก) 10N, ข) 15N และ ค) 20N ตามลำดับ	33
ภาพที่ 4.9	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วไกลเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานเมื่อระยะทางไกลเปลี่ยนแปลงไป โดยแรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน	35
ภาพที่ 4.10	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วไกลเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานเมื่อแรงกระทำที่ให้เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ผ่านระยะทางไกลไป แล้ว ก) 1000 เมตร ข) 3000 เมตร และ ค) 5000 เมตร	37
ภาพที่ 4.11	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของแรงกดที่ให้ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด ทานเมื่อความเร็วไกลเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ผ่านระยะทางไกลไปแล้ว ก) 1000 เมตร ข) 3000 เมตร และ ค) 5000 เมตร	38
ภาพที่ 4.12	แผนภูมิแสดงค่ามวลที่สูญเสียไปของชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไกลมากขึ้นเป็น 1000, 3000 และ 5000 เมตร ที่ความเร็วไกล 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร/วินาที และให้แรงกดที่ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน	41

ภาพที่ 4.13	แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไกลมากขึ้นเป็น 1000, 3000 และ 5000 เมตร ที่ความเร็วไกล 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร/วินาที และให้แรงกดที่ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน	43
ภาพที่ 4.14	แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวบริเวณรอยการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงานพินเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นจนถึง 5000 เมตร ของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ โดยที่แรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน	46
ภาพที่ 4.15	แผนภูมิแสดงค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นจนถึง 5000 เมตร ของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ โดยที่แรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน	47
ภาพที่ 4.16	ภาพผิวหน้าของใบตัดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฌ) 20 นิวตัน 5000 เมตร	48
ภาพที่ 4.17	ภาพผิวหน้าของใบตัดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฌ) 20 นิวตัน 5000 เมตร	49
ภาพที่ 4.18	ภาพผิวหน้าของใบตัดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฌ) 20 นิวตัน 5000 เมตร	50
ภาพที่ 4.19	ภาพผิวหน้าของร่องการสึกหรอบนชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฌ) 20 นิวตัน 5000 เมตร	51
ภาพที่ 4.20	ภาพผิวหน้าของร่องการสึกหรอบนชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร,	

	นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	87
ภาพที่ ผ.8	ภาพร่อนการสีกหรือในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิस्कหลังจากทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	87
ภาพที่ ผ.9	ภาพร่อนการสีกหรือในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิस्कหลังจากทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	88
ภาพที่ ผ.10	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	89
ภาพที่ ผ.11	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร	90
ภาพที่ ผ.12	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	91
ภาพที่ ผ.13	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร	91
ภาพที่ ผ.14	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร	92
ภาพที่ ผ.15	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	93
ภาพที่ ผ.16	ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญและนิยมใช้กันเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากคุณสมบัติหลากหลายประการที่เป็นข้อได้เปรียบมากกว่าการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ อย่างเช่น ความคงทนของอุปกรณ์ที่ใช้ ความสะดวกสบายในการเคลื่อนย้าย และการจัดเก็บข้อมูล อีกทั้งยังสามารถเรียกดูข้อมูลที่จัดเก็บเอาไว้ได้อย่างรวดเร็ว หรือไม่ว่าจะเป็นการประหยัดพื้นที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลอีกด้วย ในอดีตถ้าเราต้องการเก็บข้อมูลจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น หนังสือในห้องสมุดจำนวนเป็นพันเป็นหมื่นเล่ม เราอาจจะต้องใช้ห้องขนาดใหญ่หรือไม่กี่อาคารทั้งหลังเลยทีเดียว แต่ถ้าเราใช้การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล ก็จะสามารถจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดนั้นไว้ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แค่เพียงชิ้นเดียว และอุปกรณ์ที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการจัดเก็บข้อมูลก็คือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (harddisk drive) ซึ่งจะถูกประกอบอยู่ในคอมพิวเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งแบบวางตั้ง (laptop) และแบบตั้งโต๊ะ (desktop) แม้กระทั่งคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงอย่างเช่น เมนเฟรมและซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ก็ยังใช้อุปกรณ์ชนิดนี้ในการจัดเก็บข้อมูล ส่วนประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่สำหรับการอ่านข้อมูลและเขียนข้อมูลลงไปในจานบันทึก (harddisk) ก็คือ หัวอ่านเขียนจานบันทึก (read-write head) โดยคุณภาพและประสิทธิภาพของหัวอ่านเขียนนี้จะส่งผลกระทบต่อ ความรวดเร็วและความถูกต้องแม่นยำในทั้งการเรียกดู หรือจะเป็นการบันทึกข้อมูลลงบนจานบันทึกก็ตาม

ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของหัวอ่านเขียนจานบันทึกก็คือ ส่วนรองรับ (substrate) ที่จะนำไปปลูกฟิล์มวงจรรีโกลิโธโรนิกส์ต่อไป ส่วนรองรับนี้ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาอย่างเช่น วัสดุผสมอะลูมินากับไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Al_2O_3-TiC) โดยมีชื่อทางการค้าว่า ALTiC ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น 70% อะลูมินา และ 30% ไทเทเนียมคาร์ไบด์ [1] หลังจากที่ได้นำส่วนรองรับหรือว่า ALTiC wafer ไปผ่านขั้นตอนต่างๆจนได้วงจรรีโกลิโธโรนิกส์มาแล้วนั้น กระบวนการต่อไปที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งก็คือ การตัดแผ่น ALTiC wafer ให้เป็นชิ้นหัวอ่านเขียนแต่ละหัว โดยคุณภาพของการตัดนี้จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานหัวอ่านเขียนจานบันทึก คือถ้าตัดแล้วได้รอยตัดที่ไม่ตรงตามที่กำหนดหรือผิวหน้าของรอยตัดไม่ดี ก็อาจทำให้ชิ้นงานนั้นเสียหายได้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นกระบวนการในการตัดชิ้นงานหัวอ่านเขียนจานบันทึกที่ทำจากวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลและข้อสรุปที่ได้ไปพัฒนากระบวนการการตัดชิ้นงานนี้ให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูงมากขึ้นต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ คือ แรงกด (load), ความเร็ว และระยะทาง ที่มีต่อสมบัติของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ คือ ความหยาบผิว (roughness) และอัตราการสูญเสียเนื้อวัสดุ (materials removal rate) และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง

1.2.2 เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ คือ แรงกด (load), ความเร็ว และระยะทาง ที่มีต่อสมบัติของผิวตัดภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ คือ ความหยาบผิว (roughness) และอัตราการสูญเสียเนื้อวัสดุ (materials removal rate) และสภาพการสึกหรอของผิวใบตัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การทดสอบการสึกหรอโดยเทคนิคพินออนดิสก์ ใช้วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) เป็นแผ่นดิสก์ (disk) ที่มีขนาดพอดีกับร่องใส่ชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร และใช้ใบตัด (grinding wheel) ติดที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เป็นพิน (pin)

1.3.2 ทำการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะทางมากที่สุด 5000 เมตร

1.3.3 ศึกษาผลกระทบของแรงกดและเวลาที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอ โดยแรงกดที่ใช้ในช่วง 10 ถึง 20 นิวตัน และใช้ความเร็วเชิงเส้นอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 เมตรต่อวินาที

1.3.4 ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอจากร่องรอยที่ได้หลังจากการทดสอบการสึกหรอ ในด้านสมบัติความหยาบผิวโดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (profilometer) และอัตราการสูญเสียเนื้อวัสดุ

1.3.5 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ

1.3.5.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง (optical microscope, OM) และยังใช้ในการตรวจสอบลักษณะของเนื้อวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอ

1.3.5.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของเนื้อวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอโดยใช้เทคนิค EDS (energy dispersive spectroscopy)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายได้ถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอโดยเทคนิคพินออนดิस्कที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอ และสามารถอธิบายลักษณะของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้

1.4.2 สามารถนำข้อสรุปที่ได้ไปเป็นองค์ความรู้ที่ใช้ในการพัฒนาการตัดวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ สำหรับการผลิตหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในด้านคุณภาพของชิ้นงานที่ได้หลังจากการตัด และด้านพลังงานที่ใช้ในการตัดให้คุ้มค่าหรือลดน้อยลงได้ ซึ่งอาจส่งผลในแง่การลดลงของต้นทุนในการผลิตได้

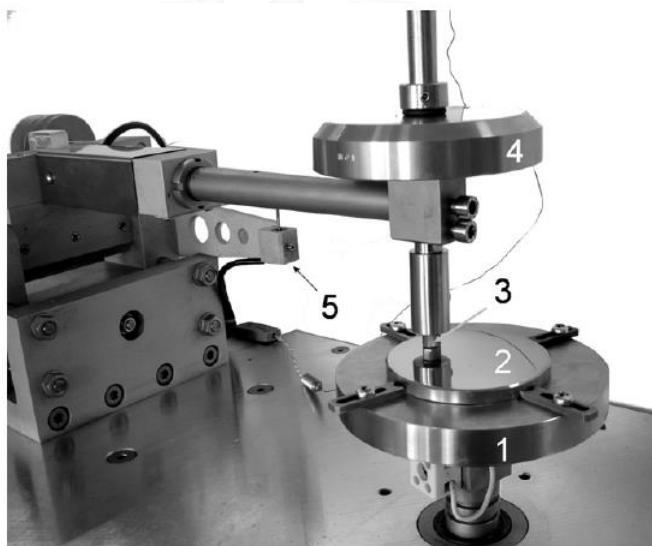
บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การทดสอบการสึกหรอโดยวิธีพินออนดิสก์ [2]

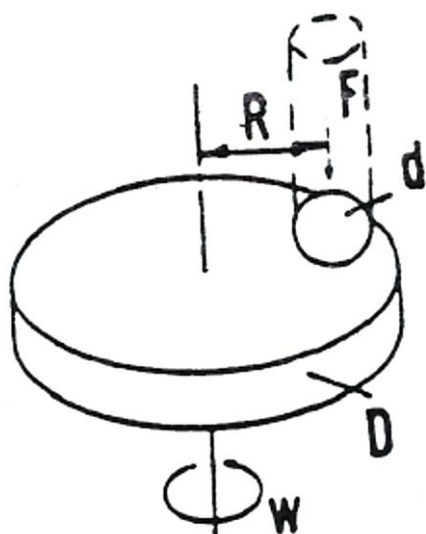
การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทางห้องปฏิบัติการสำหรับการหาค่าการสึกหรอของวัสดุระหว่างการไถ (sliding) ใช้เครื่องมือพินออนดิสก์ วัสดุที่ถูกทดสอบอยู่ภายใต้สภาวะที่ปราศจาก abrasive พื้นผิวหลักที่สนใจในการทดลองที่ใช้เครื่องมือประเภทนี้เพื่อหาค่าการสึกหรอที่ได้อธิบาย สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอาจถูกหาค่า โดยค่าต่างๆจะใช้ในหน่วย SI เพื่อพิจารณาให้เป็นมาตรฐาน



รูปที่ 2.1 ภาพตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ โดยในภาพ หมายเลข 1 แสดงตัวจัดยึดและแกนหมุนชิ้นงานดิสก์, หมายเลข 2 แสดงชิ้นงานดิสก์, หมายเลข 3 แสดงชิ้นงานพิน, หมายเลข 4 แสดงน้ำหนักที่ใช้เพื่อให้แรงกระทำ และหมายเลข 5 ตัวตรวจวัดค่า การสึกหรอ [3]

2.1.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือ

ระบบของการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ ได้แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย แกนหมุน อุปกรณ์จับยึดดิสก์, แขนจับยึดพิน และอุปกรณ์ยึดเพื่อทำให้ชิ้นงานพินเกิดแรงต้านต่อชิ้นงานดิสก์ที่หมุนด้วยการควบคุมแรงกระทำ (load) ระบบการทดสอบประเภทอื่นอย่างเช่น ให้แรงกระทำต่อชิ้นงานพินที่หมุนรอบจุดศูนย์กลางของชิ้นงานดิสก์ที่อยู่นิ่ง ไม่ว่าจะในกรณีใดร่องการสึกหรอบนชิ้นงานดิสก์ที่ได้จะเป็นวงกลมเนื่องจากการสึกหรอแต่ละรอบผ่านในเส้นทางเดิม อาจมีระบบการวัดแรงเสียดทานอย่างเช่น load cell เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



รูปที่ 2.2 ภาพวาดของระบบการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์

โดย F คือ normal force บนพิน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพินหรือบอล

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางดิสก์

R คือ รัศมีร่องการสึกหรอ (wear track)

w คือ ความเร็วการหมุนของดิสก์

มอเตอร์ขับเคลื่อน โดยสามารถปรับความเร็วและสามารถรักษาความเร็วให้คงที่ไว้ได้ภายใต้แรงกระทำที่ต้องการ ($\pm 1\%$ ของความเร็วมอเตอร์สูงสุด) มอเตอร์ควรจะถูกจับยึดในรูปแบบที่ซึ่งการสั่นของมันจะไม่ส่งผลกระทบต่อ การทดสอบ ความเร็วการหมุนปกติอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 3 rad/s (60 ถึง 600 รอบต่อนาที)

ตัวนับจำนวนรอบ โดยเครื่องทดสอบการสึกหรอควรจะต้องติดตั้งตัวนับจำนวนรอบการหมุนหรือเทียบเท่าซึ่งจะบันทึกจำนวนการหมุนของดิสก์ และต้องสามารถหยุดเครื่องทดสอบหลังจากที่ครบตามจำนวนรอบการหมุนที่ได้ตั้งค่าเอาไว้

ตัวจับยึดชิ้นงานพินและแกนคาน โดยตัวจับยึดชิ้นงานให้อยู่หนึ่งจะติดอยู่กับแกนคานซึ่งมีเดือยอยู่ การเพิ่มน้ำหนักเป็นการให้แรงกระทำชนิดหนึ่ง ซึ่งแรงในการทดสอบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลของน้ำหนักที่ให้ ในทางอุดมคติเดือยของแกนคานควรมีตำแหน่งอยู่ในระนาบของจุดสัมผัสการสึกหรอเพื่อหลีกเลี่ยงแรงกระทำที่ไม่เกี่ยวข้องเนื่องจากแรงเสียดทาน ทั้งตัวจับยึดชิ้นงานและแกนคานควรมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพื่อลดการสั่นในระหว่างการทดสอบ

ระบบวัดการสึกหรอ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าการสึกหรอในเชิงเส้นนั้นควรมีความไวได้ถึง 2.5 ไมโครเมตรหรือดีกว่า เครื่องชั่งถูกใช้เพื่อหาค่ามวลที่สูญเสียน (mass loss) ของชิ้นงานทดสอบควรมีความไวได้ถึง 0.1 มิลลิกรัม หรือดีกว่า ในสถานะที่มีการสึกหรอต่ำนั้นต้องการอาจต้องการความไวที่มากกว่านี้

2.1.1.2 ชิ้นงานทดสอบและการเตรียม

วัสดุ วิธีการทดสอบนี้อาจถูกนำไปใช้กับวัสดุหลากหลายชนิด ความต้องการเพียงอย่างเดียวคือชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดตามที่กำหนดที่สามารถเตรียมได้ และทนต่อความเค้นที่ให้และไม่เกิดการพัง (failure) หรือโค้งงอจนเกินกว่าจะรับได้ วัสดุที่จะทดสอบควรระบุ ขนาด, ลักษณะ

ผิวหน้า (surface finish), ประเภทวัสดุ, รูปแบบ, ส่วนผสมทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค, กระบวนการปรับปรุง และค่าความแข็ง (ถ้าเหมาะสม)

ชิ้นงานทดสอบ โดยชิ้นงานทดสอบพื้นทั่วไปมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกหรือทรงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงจาก 2 ถึง 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบดิสก์โดยทั่วไปอยู่ในช่วงจาก 30 ถึง 100 มิลลิเมตร และมีความหนาในช่วง 2 ถึง 10 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในห้องปฏิบัติการด้วยระบบพินออนดิสก์อยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เอกลักษณะของชิ้นงานทดสอบการสึกหรอที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

	Composition (weight%)	Microstructure	Hardness (HV 10)	Roughness ^A	
				R_a (mean) (μm)	R_s (mean) (μm)
Steel ball (100 Cr6) (AISI 52 100) ^B Diameter 10 mm	1.35 to 1.65 Cr ← 0.95 to 1.10 C 0.15 to 0.35 Si 0.25 to 0.45 Mn	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^C Diameter 40 mm	← <0.030 P <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	852 ± 14	0.952	0.113
Alumina ball, diameter = 10 mm ^D	← 95 % Al ₂ O ₃ (with addi- tives of TiO ₂ ,	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina disc, diameter = 40.6 mm ^D	← MgO, and ZnO)		1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^A Measured by stylus profilometry. R_z is maximum peak-to-valley roughness. R_a is arithmetic average roughness.
^B Standard ball-bearing balls (SKF).
^C Standard spacers for thrust bearings (INA).
^D Manufactured by Compagnie Industrielle des Ceramiques Electroniques, France.

ลักษณะผิวหน้า ปกติแนะนำให้ค่าความหยาบผิวอยู่ในระดับ 0.8 ไมโครเมตร (32 μm) หรือต่ำกว่า (ผิวที่หยาบจะวัดค่าของรอยจากการสึกหรอได้ยาก)

ต้องระมัดระวังในการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจาก subsurface การเตรียมผิวหน้าเฉพาะอาจเหมาะกับบางแผนงานการทดสอบ ต้องระบุประเภทของผิวหน้าและการเตรียมผิวหน้าลงในรายงานด้วย

2.1.1.3 ตัวแปรในการทดสอบ

แรงกระทำ คือค่าของแรงในหน่วยนิวตัน (N) ที่จุดสัมผัสการสึกหรอ, ความเร็ว คือความเร็วไกลสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสในหน่วยเมตรต่อวินาที, ระยะทาง คือระยะทางไกลสะสมในหน่วยเมตร, อุณหภูมิ คืออุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ตำแหน่งใกล้จุดสัมผัสการสึกหรอ, บรรยากาศ คือบรรยากาศโดยรอบจุดสัมผัสการสึกหรอ (อากาศในห้องปฏิบัติการ, ความชื้นสัมพัทธ์, อาร์กอน (Ar), สารหล่อลื่น)

2.1.1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ และทำให้แห้งก่อนที่จะชั่งน้ำหนัก วัดค่า หรือทดสอบ ดูแลกำจัดสิ่งสกปรกหรือสารแปลกปลอมอื่น ๆ จากชิ้นงานทดสอบ ใช้ตัวทำละลายหรือสารทำความสะอาดที่ไม่มีคลอรีนผสมอยู่และไม่ทำให้เกิดชั้นฟิล์ม ทำให้วัสดุแห้งด้วยการเปิดเกรนเพื่อกำจัดร่องรอยของเหลวที่ใช้ทำความสะอาดซึ่งอาจถูกกักในวัสดุ ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นเหล็กกล้า

(ferromagnetic) ที่มีความเป็นแม่เหล็กเหลือค้างอยู่ควรกำจัดความเป็นแม่เหล็กออกก่อน และรายงานวิธีที่ใช้ทำความสะอาดด้วย

ขั้นตอนที่ 2 วัดขนาดชิ้นงานทดสอบ โดยให้มีความละเอียดถึง 2.5 ไมโครเมตร หรือวัดน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบโดยให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม

ขั้นตอนที่ 3 ใส่ดิสก์ในอุปกรณ์จับยึดอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ว่าดิสก์จะได้ถูกตรึงตั้งฉาก ($\pm 1^\circ$) กับแกนหมุน

ขั้นตอนที่ 4 ใส่ชิ้นงานตัวอย่างพินในตัวจับยึดของมันเป็นอย่างระมัดระวัง และปรับให้ตั้งฉาก ($\pm 1^\circ$) กับผิวหน้าดิสก์เมื่อสัมผัสกัน เพื่อให้คงสภาวะที่ชิ้นงานสัมผัสกันเอาไว้ได้

ขั้นตอนที่ 5 เพิ่มมวลที่เหมาะสมให้แก่ระบบคาน เพื่อทำให้ได้แรงกดที่เลือกไว้ที่พินจะกระทำต่อดิสก์

ขั้นตอนที่ 6 เริ่มการทำงานของมอเตอร์และปรับความเร็วให้ได้ค่าตามที่ต้องการ ในขณะที่ยังยึดชิ้นงานพินไม่ให้สัมผัสกับชิ้นงานดิสก์ และหยุดการทำงานของมอเตอร์

ขั้นตอนที่ 7 ปรับตั้งตัวนับจำนวนรอบเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ

ขั้นตอนที่ 8 เริ่มการทดสอบโดยให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกันภายใต้แรงกระทำตามที่กำหนด และหยุดการทดสอบเมื่อได้จำนวนรอบครบตามที่ต้องการ การทดสอบไม่ควรถูกขัดขวางหรือเริ่มใหม่

ขั้นตอนที่ 9 นำชิ้นงานออกและกำจัดเศษวัสดุที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอ (wear debris)

ขั้นตอนที่ 10 วัดขนาดหรือชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 11 ทำการทดลองซ้ำด้วยชิ้นงานอื่นเพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอ สำหรับผลการทดลองที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.1.1.5 การคำนวณและรายงานผล

การวัดค่าการสึกหรอควรถูกรายงานเป็น ปริมาตรที่สูญเสีย (volume loss) ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับพินและดิสก์แยกกัน ใช้ตามสมการสำหรับปริมาตรที่สูญเสียเมื่อพินเริ่มต้นมีปลายรูปทรงกลมรัศมี r และดิสก์เริ่มต้นเป็นแผ่นเรียบ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ว่าเพียงชิ้นงานเดียวที่สึกหรออย่างมีนัยสำคัญโดย

$$\text{ปริมาตรที่สูญเสียของพิน (mm}^3\text{)} : V_p = \frac{\pi d^4}{64r}$$

โดยที่ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องการสึกหรอ (mm)

r คือรัศมีปลายพิน (mm)

สมมติให้การสึกหรอของดิสก์ไม่มีนัยสำคัญ นี่คือการประมาณรูปร่างถูกต้องที่ 1% สำหรับร่องการสึกหรอหรือรัศมีทรงกลม < 0.3 และถูกต้องที่ 5% สำหรับร่องการสึกหรอหรือรัศมีทรงกลม < 0.7 โดย

$$\text{สมการที่ถูกต้องแน่นอนจะเป็น } V_p = \frac{(\pi h/6)}{[3d^2/(4+h^2)]} \quad \text{เมื่อ } h = r - [r^2 - d^2/4]^{1/2}$$

$$\text{ปริมาตรที่สูญเสียของดิสก์ (mm}^3\text{)} : V_d = \frac{\pi R D^3}{6r}$$

โดยที่ R คือ รัศมีร่องการสึกหรอ (wear track) (mm)

D คือความลึกร่องการสึกหรอ (mm)

สมมติให้การสึกหรอของพินไม่มีนัยสำคัญ นี่คือการประมาณรูปร่างถูกต้องที่ 1% สำหรับร่องการสึกหรอหรือรัศมีทรงกลม <0.3 และถูกต้องที่ 5% สำหรับร่องการสึกหรอหรือรัศมีทรงกลม <0.8 โดยสมการที่ถูกต้องแน่นอนจะเป็น $V_d = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(D/2r) - (D/4)(4R^2 - D^2)^{1/2}]$

การวัดค่าร่องการสึกหรอควรทำอย่างน้อยสองตำแหน่งทั้งบนผิวหน้าของพินและบนผิวหน้าของดิสก์ และเฉลี่ยเป็นผลสุดท้าย ในเหตุการณ์ที่ทั้งพินและดิสก์สึกหรออย่างมีนัยสำคัญ มันจำเป็นที่จะต้องวัดค่ารายละเอียด (profile) ความลึกการสึกหรอของทั้งคู่ วิธีที่เหมาะสมใช้ stylus profiling ซึ่งเป็นวิธีการเดียวที่หาค่ารูปร่างสุดท้ายที่แน่นอนของผิวหน้าการสึกหรอ และเพื่อคำนวณปริมาตรของวัสดุที่สูญเสียเนื่องจากการสึกหรอ ในกรณีที่ดินสึกหรอ รายละเอียดร่องการสึกหรอเฉลี่ยสามารถที่จะอินทิเกรต (integrate) เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดร่องและคูณด้วยความยาวร่องเฉลี่ยเพื่อให้ได้ปริมาตรการสึกหรอของดิสก์ ในกรณีที่ดินสึกหรอ รายละเอียดร่องการสึกหรอสามารถหาค่าในสองทิศทางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลของรายละเอียดถูกเฉลี่ยและใช้ในจำนวนของการหมุนที่คำนวณปริมาตรการสึกหรอของพิน

ผลของมวลที่สูญเสียอาจถูกใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบวัสดุที่มีความหนาแน่นเท่ากัน วิธีทดสอบนี้รายงานการสึกหรอเป็นปริมาตรที่สูญเสียเพื่อที่ไม่ให้เกิดการสับสนโดยการแปรผันของความหนาแน่น ใช้อย่างระมัดระวังและรายงานค่าความหนาแน่นที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุที่ทดสอบเมื่อการคำนวณปริมาตรสูญเสียจากมวลสูญเสียที่หาค่า ใช้ตามสมการการเปลี่ยนมวลสูญเสียเป็นปริมาตรสูญเสียคือ

$$\text{ปริมาตรสูญเสีย (mm}^3\text{)} : V_l = \frac{m_l}{\rho}$$

โดยที่ m_l คือมวลที่สูญเสีย (g) และ ρ คือความหนาแน่น (g/cm^3)

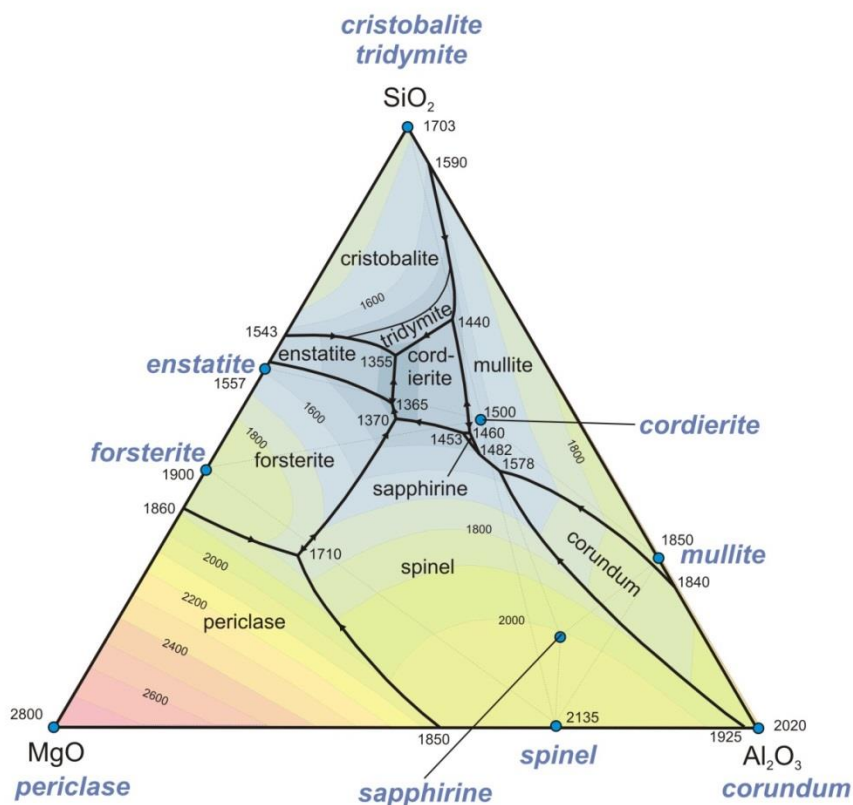
ถ้าวัสดุที่ทดสอบแสดงการถ่ายเทระหว่างชิ้นงานทดสอบโดยไม่สูญเสียจากระบบ ปริมาตรสูญเสียอาจไม่เพียงพอที่จะสะท้อนให้เห็นจำนวนที่แท้จริงหรือความรุนแรงของการสึกหรอ ในวิธีทดสอบนี้สำหรับการรายงานการสึกหรอไม่ควรถูกใช้

สัมประสิทธิ์การสึกหรอควรถูกรายงานเมื่อเป็นประโยชน์ และระบุสถานะที่หาค่าแรงเสียดทาน ตัวอย่างเช่น สภาวะเริ่มต้น และสภาวะคงตัว (steady state) การกำหนดสภาวะการทดสอบวัสดุให้เพียงพอเป็นสิ่งสำคัญ อย่างน้อยที่สุดรายงานควรจะกำหนดประเภทของวัสดุ, รูปแบบ, กระบวนการปรับปรุง, ผิวหน้าสุดท้าย และวิธีการเตรียมชิ้นงาน ถ้าเป็นไปได้ควรบันทึกความแข็งผิวด้วย

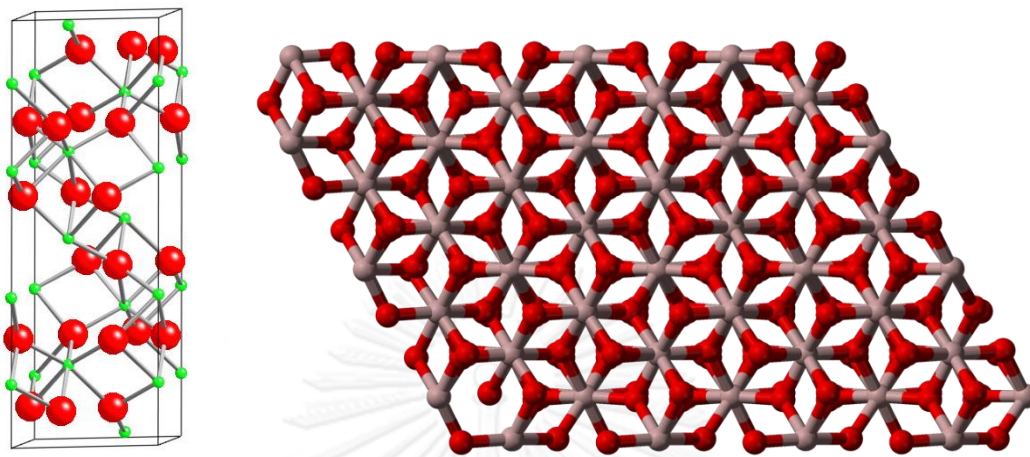
2.1.2 วัสดุอะลูมินา [4]

วัสดุอะลูมินาหรือที่รู้จักกันในชื่อ mullite porcelain ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและต้านทานความร้อนได้ดี อันเนื่องมาจากพันธะทางเคมีที่แข็งแรงระหว่างอะลูมิเนียมไอออนและออกซิเจนไอออน และอะลูมินายังมีความเสถียรทางกายภาพสูง อย่างเช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูงคือ 2320K มีค่าความแข็งแรงที่สุดในบรรดาออกไซด์ด้วยกัน มีความแข็งแรงทางกลสูงที่อุณหภูมิห้อง และจะลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิเหนือ 1373K อะลูมินายังเป็นวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า มีความเสถียรต่อสารเคมีมากและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง ไม่ละลายในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในกรดแก่และสารละลาย alkaline สมบัติทางกลนั้นขึ้นอยู่กับผิวหน้าของวัสดุเช่นการมีตำหนิหรือรอยแตกที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นทำให้สมบัติทางกลลดลงได้

จากรูปที่ 2.3 ในแผนภูมิเฟสสมดุลของระบบ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ ที่ตำแหน่ง Al_2O_3 บริสุทธิ์ (100%) จะแสดงเฟสเป็นคอร์รันดัม (corundum) หรืออาจเรียกเป็น α -alumina โดยโครงสร้างผลึกคอร์รันดัมเป็นโครงสร้างผลึกชนิดฐาน hexagonal closed pack (HCP) ดังในรูปที่ 2.4 แคทไอออน (cation) คืออะลูมิเนียมไอออนจะอยู่ในตำแหน่ง octahedral site ระหว่างชั้น closed pack ของแอนไอออน (anion) คือออกซิเจนไอออน แต่มีเพียง 2/3 ตำแหน่งเท่านั้นที่มีอะลูมิเนียมไอออนอยู่ที่เหลืออีก 1/3 ของตำแหน่ง octahedral site ทั้งหมดจะว่าง



รูปที่ 2.3 แผนภูมิเฟสสมดุลของระบบ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบคอรัันดัมของวัสดุอะลูมินา

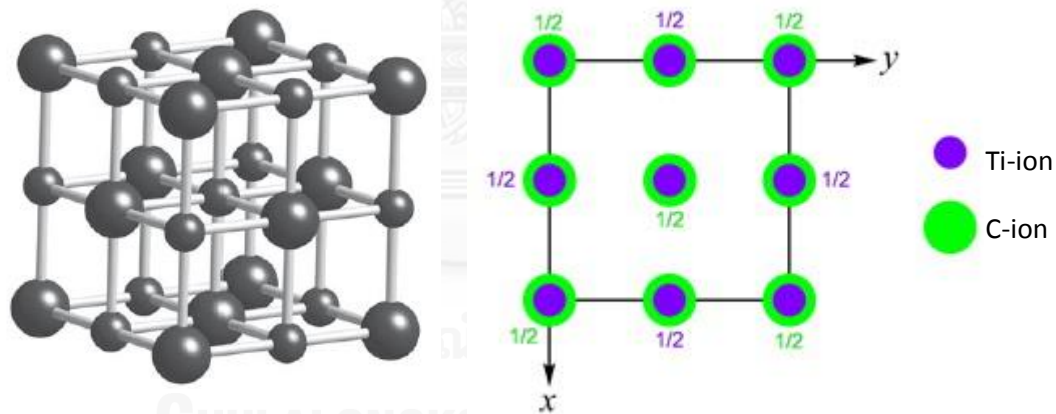
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุอะลูมินาโดยทั่วไป [5]

สมบัติทางกล	ค่าสำหรับวัสดุอะลูมินา
ยังมอดูลัส (GPa)	300-370
ความแข็งแรงต่อการกดอัด (MPa)	1288-2100
ความแข็งแรงต่อการดึงยืด (MPa)	105-107
ความแข็งแรงต่อการงอ (MPa)	185-248
สมบัติทางกายภาพ	
การขยายตัวทางความร้อน ($10^{-6}/K$)	3.6-7.3
การนำความร้อน (W/m·K)	27
อุณหภูมิหลอมเหลว (K)	2320
อุณหภูมิที่ใช้งาน (K)	173-1923
ความต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot mm^2/m$)	$10^6 - 10^{14}$
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.17-0.18
ความหนาแน่น (kg/m^3)	3880

2.1.3 วัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์ [6]

ไทเทเนียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึกแบบ rocksalt โดยโครงสร้างผลึกแบบ rocksalt นั้นจะมีแอนไอออนเรียงตัวเป็นแบบ face center cubic (FCC) และแคทไอออนอยู่ในตำแหน่ง octahedral site ทั้งหมดของแอนไอออน ดังแสดงในรูป 2.5 เลขโคออดิเนชัน (coordination number) ของทั้งแอนไอออนและแคทไอออนมีค่าเท่ากับ 6 อะตอมของ Ti จัดเรียงตัวเป็น close-packed และมีอะตอม C อยู่ที่ตำแหน่ง interstitial site เลขโคออดิเนชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนรัศมี (radius ratio) = r_x/r_m เมื่อ r_x คือรัศมีของอะตอม interstitial (อะตอม C = 70 pm) และ r_m คือรัศมีของอะตอมโลหะ (อะตอม Ti = 140 pm) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.414 ถึง 0.732 ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของ Pauling วัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกันนี้ได้แก่ NaCl, KCl, CaO, NiO และ MnO เป็นต้นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบ rocksalt ส่วนมากมีแนวโน้มที่จะเป็น nonstoichiometric คือ $Ti_{1-x}C$ โดยทำให้วัสดุแสดงสมบัติ semiconductor

วัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยทั่วไปจะมีค่าความแข็งที่สูง ไม่ไวต่อสารเคมี และมีจุดหลอมเหลวที่สูงถึง 4940K ซึ่งส่งผลให้สามารถนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆได้ และยังสามารถทนต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidation) ได้ถึง 1473K สมบัติอื่นๆของวัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั่วไป แสดงไว้ในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกแบบ rocksalt ที่มีอะตอม C อยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และอะตอม Ti อยู่ที่ตำแหน่ง 1/2, 1/2, 1/2

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยทั่วไป [7]

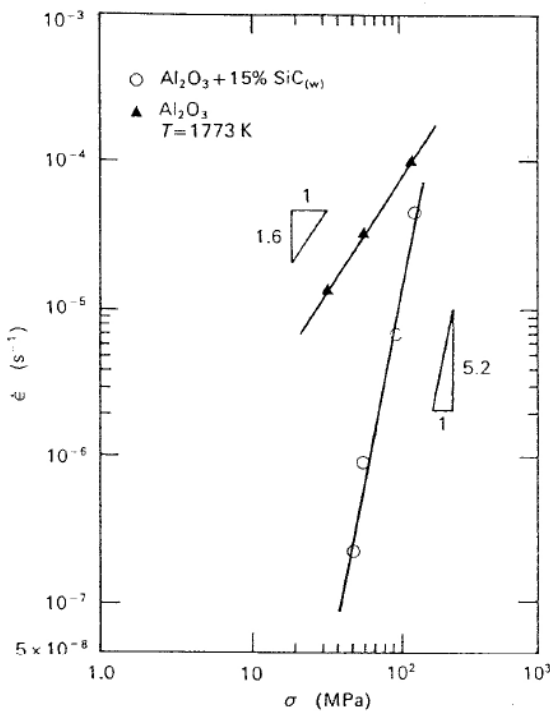
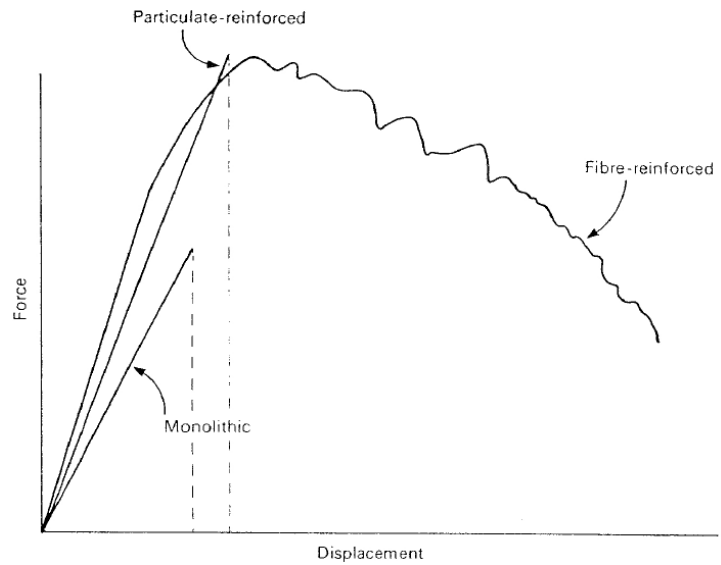
สมบัติทางกล	ค่าสำหรับวัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์
ยังมอดูลัส (GPa)	430-451
ความแข็งแรงต่อการกดอัด (MPa)	2500
ความแข็งแรงต่อการงอ (MPa)	420

สมบัติทางกายภาพ	
การขยายตัวทางความร้อน ($10^{-6}/K$)	4.1-7.7
การนำความร้อน (W/m·K)	110
อุณหภูมิหลอมเหลว (K)	3373
อุณหภูมิที่ใช้งาน (K)	293-1873
ความต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot mm^2/m$)	0.2-100
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.07
ความหนาแน่น (kg/m^3)	4940

2.1.4 วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก [8]

วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (ceramic matrix composites : CMCs) เป็นวัสดุที่น่าสนใจอย่างมากอันเนื่องมาจากสมบัติต่างๆของตัววัสดุเซรามิกเอง อย่างเช่น ความเป็นฉนวนไฟฟ้า ฉนวนความร้อน มีจุดหลอมเหลวสูงจึงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆอย่างเช่นโลหะหรือพอลิเมอร์ สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมและการกัดกร่อนได้ดี และมีสมบัติทางกลที่ดีอย่างเช่น ความแข็งแรงสูง ความแกร่งสูง คุณสมบัติเด่นต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากพันธะทางเคมีที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกมีความแข็งแรง (พันธะโควาเลนต์และพันธะไอออนิก) แต่ข้อเสียสำคัญของวัสดุเซรามิกส่วนใหญ่คือมีความเปราะสูงและสามารถแตกหักได้ง่ายโดยปราศจากการเตือนล่วงหน้า จึงได้เป็นแนวคิดสำคัญสำหรับการพัฒนาวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกขึ้นมาเพื่อลดข้อด้อยในจุดนี้ไป แต่ยังไม่มียึดเสริมแรงชนิดเส้นใยหรือวิสเกอร์ (whisker) ที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ทั้งในขั้นตอนการผลิตและการใช้งานจึงทำให้วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกที่ผลิตขึ้นนั้นยังมีสมบัติที่ไม่ดีนัก จนกระทั่งต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตที่สามารถผลิตตัวเสริมแรงเซรามิกที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและวิสเกอร์ขึ้นมาได้อย่างเช่นเส้นใย SiC จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุเนื้อพื้นและตัวเสริมแรง ซึ่งถ้ามีความแตกต่างระหว่างทั้งสองจะนำไปสู่การเกิดความเค้นเชิงความร้อน (thermal stress) ขึ้นในขั้นตอนการเย็นตัวจากอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการใช้งานที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญและต้องระมัดระวังในการเลือกใช้ตัวเสริมแรงกับวัสดุเนื้อพื้น

รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกเนื้อเดียวกับวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกที่เสริมแรงด้วยผงอนุภาคและแบบเส้นใย



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุอะลูมินาเนื้อเดียวกับวัสดุผสมอะลูมินาเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

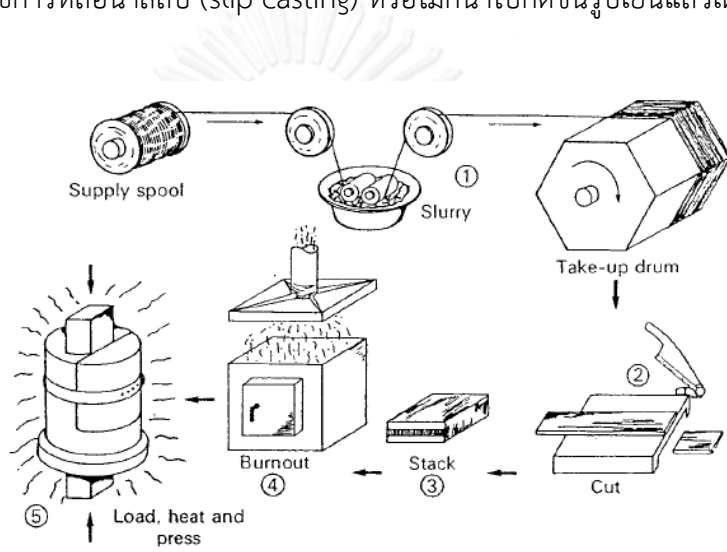
2.1.4.1 กรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก

กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกที่นิยมใช้กันมีหลายวิธีแต่ส่วนใหญ่จะเป็นวิธีเดียวกันกับที่ใช้ในการผลิตวัสดุเซรามิกเนื้อเดียว (monolithic) โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก 4 วิธีคือ

วิธีที่ 1 การผสมและกดอัดทั่วไป วิธีนี้จะเริ่มจากผสมผงของเซรามิกเนื้อพื้นรวมกับผงตัวเสริมแรง โดยอาจใช้ในรูปแบบของผงอนุภาคหรือวิสเกอร์ก็ได้ และเติมตัวผสมลงไปด้วย จะได้เป็นของผสมจากนั้นนำไปกดขึ้นรูปและเผาขึ้นรูปต่อไป หรือไม่อาจใช้การกดขณะร้อน (hot pressed) ก็ได้ แต่วิธีนี้ก็มีข้อจำกัดอยู่หลายประการอย่างเช่น การใส่ผงตัวเสริมแรงในปริมาณมาก ๆ นั้นจะทำให้

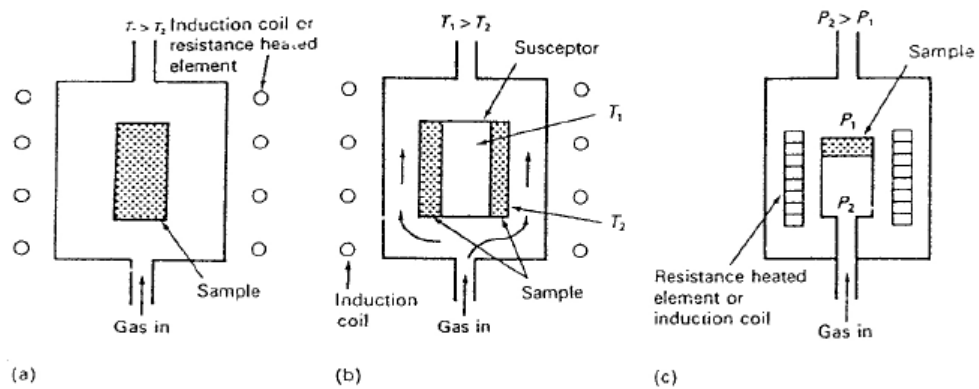
การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นทำได้ค่อนข้างยาก และถ้าใช้เป็นวิสเกอร์อาจเกิดปัญหาการแตกหัวของตัววิสเกอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยเฉพาะการขึ้นรูปเย็น

วิธีที่ 2 เทคนิคการใช้สเลอรี (slurry) วิธีนี้เป็นกรรมวิธีแบบเปียก โดยการนำผงวัสดุเนื้อฟุ้งกับผงตัวเสริมแรงละลายลงในตัวทำละลายอย่างเช่นน้ำ และเติมสารช่วยกระจายลอยตัว (defloculant) และควบคุมค่า pH ของสารละลายจะช่วยทำให้ผงอนุภาคกระจายตัวได้สม่ำเสมอ และยังสามารถใช้การสั่นเหนือเสียง (ultrasonic vibration) เข้าช่วยได้ และหลังจากนั้นสามารถนำไปผลิตต่อด้วยวิธีการหล่อหน้าสลิบ (slip casting) หรือไม่ก็นำไปกดขึ้นรูปเย็นแล้วเผาผนึก หรือกดขึ้นรูปร้อนก็ได้



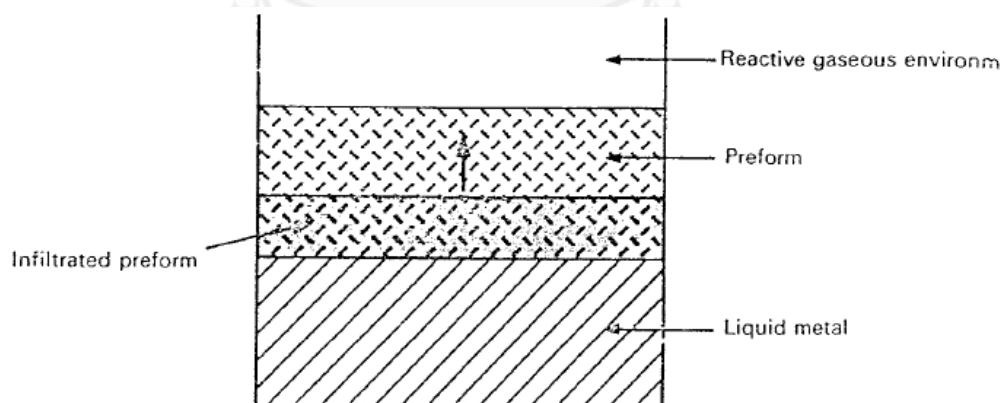
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงขั้นตอนกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อฟุ้งเซรามิกด้วยเทคนิคการใช้สเลอรี

วิธีที่ 3 เทคนิคการเคลือบไอ (vapor deposition) กรรมวิธีการผลิตด้วยการเคลือบไอที่นำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตวัสดุผสมเนื้อฟุ้งเซรามิกตัวอย่างเช่น การเคลือบไอทางเคมี (CVD) หรืออาจเป็นการเคลือบไอทางกายภาพ (PVD) ชนิดการระเหย การใช้พลาสมา (plasma) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการเคลือบไอทางเคมีนั้นสามารถควบคุมส่วนผสมทางเคมีได้ดีกว่าและมีอัตราการเคลือบผิวที่รวดเร็วกว่า ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นในสถานะแก๊สเกิดเป็นสารประกอบไปเกาะลงบนผิวของส่วนรองรับ โดยอาจเป็นพรีฟอร์มที่ทำจากเส้นใยตัวเสริมแรง โดยอาจเรียกว่าการแทรกซึมทางเคมี (chemical vapor infiltration : CVI) ถึงแม้ว่าอัตราการเกาะผิวด้วยวิธีนี้จะเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบไอวิธีอื่น แต่ก็ยังถือว่าช้าอยู่คืออัตราเร็วสูงสุดทำได้แค่เพียง 2.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่ก็ยังได้มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเช่นกับวัสดุผสมเนื้อฟุ้งเซรามิกที่เสริมแรงด้วยคาร์ไบด์อย่างเช่น B_4C , SiC , TaC และ TiC หรือจะเป็นไนไตรด์อย่างเช่น Si_3N_4 , BN



รูปที่ 2.9 ภาพวาดกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกด้วยวิธีแทรกซึมทางเคมี (a) แบบอุณหภูมิคงที่, (b) แบบ thermal gradient, (c)แบบ pressure gradient

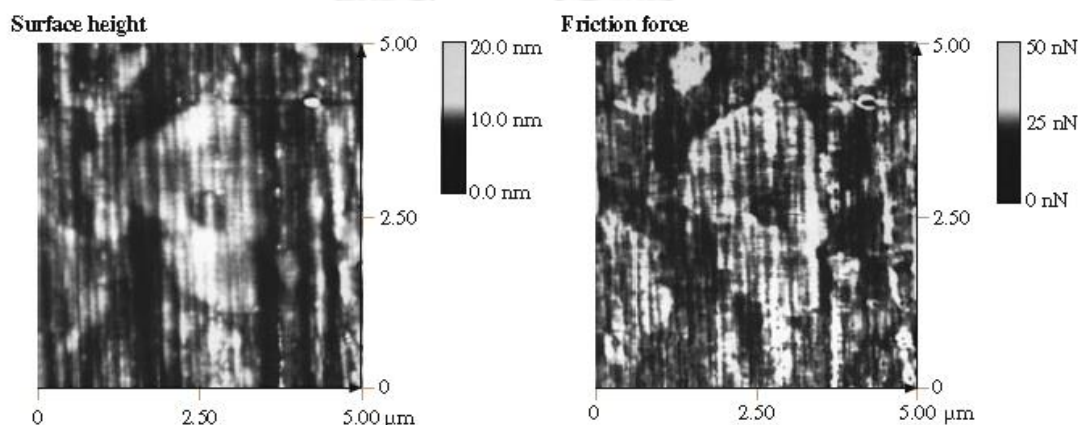
วิธีที่ 4 กรรมวิธีแลนไซด์ (lanxide) เป็นกรรมวิธีการผลิตที่อาศัยการเกิดเนื้อพื้นเซรามิกจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะหลอมเหลวและก๊าซตัวอย่างเช่น $Al_{(l)} + O_{2(g)} = Al_2O_{3(l)}$ เฟสเซรามิกจะเกิดการโตขึ้นภายนอกผิวของโลหะหลอมเหลวและผ่านเข้าไปยังพริฟอร์มดังรูปที่ 2.10 หรืออาจใช้เป็นผงอนุภาคโรยเอาไว้บนผิวโลหะหลอมเหลวก็ได้ และเมื่อเกิดเฟสเซรามิกขึ้นมากก็จะเกิดเป็นวัสดุเสริมแรงด้วยผงอนุภาคได้เช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่สำคัญคือตัวเสริมแรงจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้ และจะต้องเปียกผิวกับเนื้อพื้นเซรามิก เราสามารถควบคุมอัตราการโตของเฟสเซรามิกได้โดยควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยปกติอัตราการโตจะอยู่ที่ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่วิธีนี้ยังสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีความหนาได้ถึง 20 เซนติเมตร และถ้าปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน (exothermic) ที่รุนแรงมากจะทำให้เกิดการขยายตัวได้ด้วยตัวเอง (self-propagation) ตัวอย่างเช่น $4Al + 3TiO_2 + 3C = 2Al_2O_3 + 3TiC$



รูปที่ 2.10 ภาพวาดของกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกด้วยวิธีแลนไซด์

2.1.5 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ [9]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้งสมบัติต่างๆที่เป็นจุดเด่นและจุดด้อยของทั้งวัสดุอะลูมินา, วัสดุไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเหตุผลที่ทำให้มีการพัฒนาวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกขึ้นมาใช้งาน วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ก็เป็นวัสดุอีกหนึ่งชนิดที่ในปัจจุบันมีการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น งานที่นิยมนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้ได้แก่ใช้ทำ cutting tool ทำ die สำหรับการดึงหรือการ extrusion และชิ้นส่วนอื่นๆอีกมากมายที่ใช้ในอุณหภูมิสูง ยังมีการใช้งานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็นำไปใช้เป็นส่วนรองรับในการผลิตหัวอ่านเขียนจานบันทึกซึ่งใช้วัสดุนี้ที่มีส่วนประกอบของเฟสทั้งสอง (Al_2O_3 ต่อ TiC) อยู่ประมาณ 70:30 wt% โดยปกติเกรนไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่าความแข็ง Knoop อยู่ที่ประมาณ 2800



รูปที่ 2.11 แสดงค่าความหยาบผิวและแผนที่แรงเสียดทานสำหรับ Al_2O_3 -TiC (70:30 wt%) ที่แรงกระทำ 166 นาโนนิวตัน

kg/mm^2 ซึ่งสูงกว่าเกรนของอะลูมินาที่มีค่าประมาณ 2100 kg/mm^2 ดังนั้นเมื่อเกิดการสึกหรอเกรนของไทเทเนียมคาร์ไบด์ไม่ได้ถูกขัดไปมากและเป็นผลให้มีระดับสูงกว่าเล็กน้อย (สูงกว่าประมาณ 2-3 นาโนเมตรจากเกรนของอะลูมินา) จากการวัดค่าแรงเสียดทานเกรนไทเทเนียมคาร์ไบด์แสดงค่าแรงเสียดทานที่สูงกว่าเกรนของอะลูมินา และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเกรนไทเทเนียมคาร์ไบด์และเกรนอะลูมินาเป็น 0.034 และ 0.026 ตามลำดับ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่าประมาณ 0.03 ความหยาบผิวและลักษณะแรงเสียดทานแสดงในรูปที่ 2.11

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

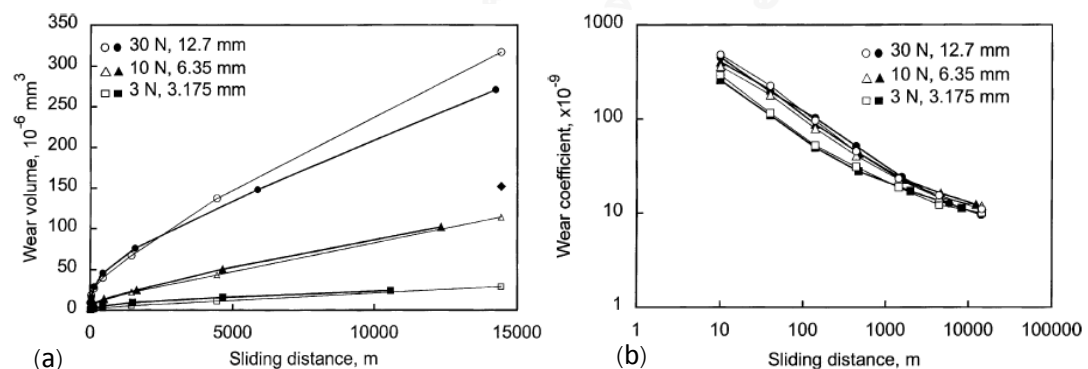
A. Ravikiran et al. [10] ได้ศึกษาผลกระทบของความดันจุดสัมผัสและแรงกระทำที่มีต่อกำสีกของวัสดุอะลูมินา ด้วยเทคนิคบอลออนดิสก์ โดยใช้ลูกบอลและดิสก์ที่ทำจากอะลูมินาที่มีขนาดเกรนแตกต่างกันคือ 17 และ 10 ไมโครเมตรตามลำดับ การทดสอบจะใช้ความเร็วเชิงเส้นคงที่ที่ 0.15 เมตรต่อวินาที ส่วนแรงกระทำจะเปลี่ยนไปตามเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลที่ใช้ ดังระบุไว้ในตารางที่ 2.4

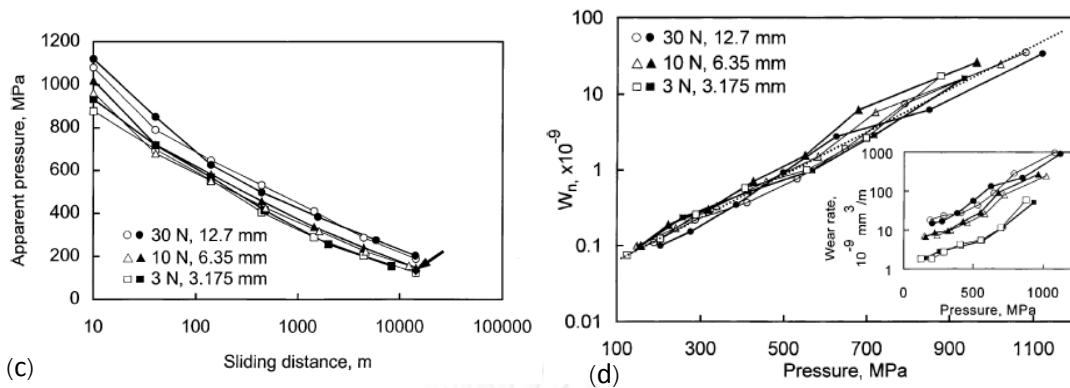
ตารางที่ 2.4 แสดงสถานะที่ใช้ในการทดลอง

Ball diameter (mm)	Load (N)	Hertzian contact diameter (μm)	Ball diameter (mm)
12.70	30	181	12.70
6.35	10	100	6.35
3.18	3	53	3.18

Hertzian pressure (MPa)	Disk track diameter (mm)	$L^a (\times 10^{-3})$
1124	36	1.6
1237	30	1.06
1315	18	0.94

เนื่องจากเป็นชิ้นงานบอลร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเมื่อระยะทางการไถลเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่จุดสัมผัสเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ความดันที่จุดสัมผัสจึงมีค่าลดลง จากการที่ได้ให้แรงกระทำคงที่ ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรการสึกหรอกับระยะทางไถลในรูปที่ 2.1.2 (a) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสึกหรอกับระยะทางการไถลที่แรงกระทำต่างๆ ในรูป 2.1.2 (b)





รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณการสึกหรอกับระยะทางไกล (b) สัมประสิทธิ์การสึกหรอกับระยะทางการไกล (c) ความดันกับระยะทางไกล (d) อัตราการสึกหรอกับความดัน

และสามารถที่จะสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอนั้นลดลงได้เมื่อเพิ่มพื้นที่จุดสัมผัส และสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า มี asperity ปริมาณมากที่เกิดการแปรรูปเมื่อได้รับแรงกระทำ และผสมกันระหว่างจุดสัมผัสที่แปรรูปยืดหยุ่นและแปรรูปถาวร ดังนั้นอัตราการสึกหรอควรจะขึ้นกับความดันจุดสัมผัส

Deng Jianxin et al. [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมกรรมการสึกหรอของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการกดขึ้นรูปร้อน และเติม CaF_2 ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคเป็นชั้นๆ (lamellar) ที่มีความแข็งแรงต่อแรงเฉือนต่ำ จึงเป็นประโยชน์ที่จะใช้ให้เป็นสารหล่อลื่น เพื่อสร้างให้เป็นวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกหล่อลื่นด้วยตัวเอง โดยองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงในตารางที่ 2.5

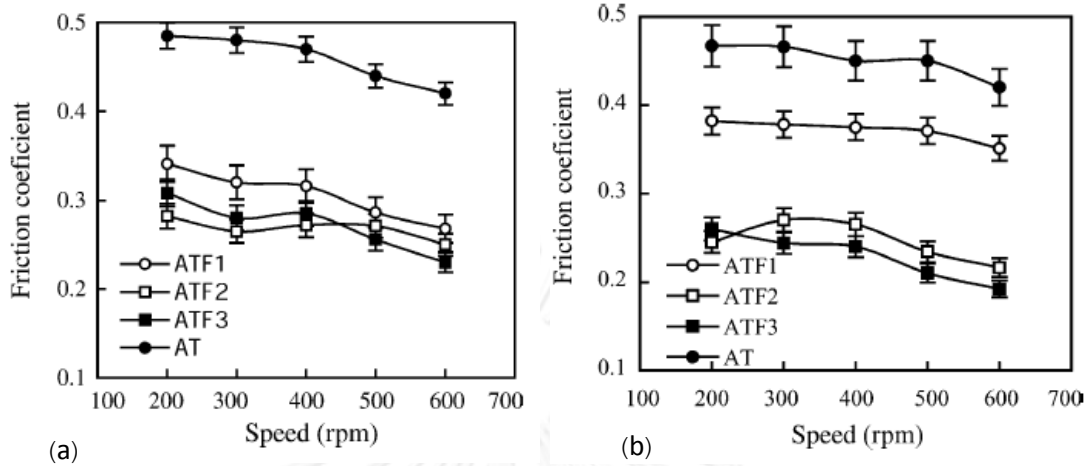
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุผสม $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$

Specimen	Compositions (vol. %) ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{TiC} = 1:1$, v/v)	Flexural strength (MPa)
AT	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	800 ± 43
ATF1	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + 5\% \text{CaF}_2$	478 ± 32
ATF2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + 10\% \text{CaF}_2$	590 ± 29
ATF3	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + 15\% \text{CaF}_2$	418 ± 33

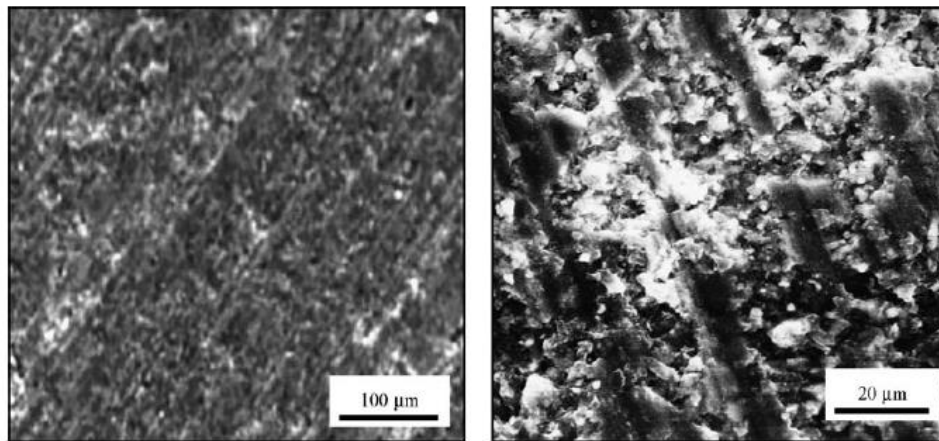
Specimen	Hardness (GPa)	Fracture toughness ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
AT	20.0 ± 0.6	5.2 ± 0.3
ATF1	13.2 ± 0.8	3.4 ± 0.2
ATF2	15.3 ± 0.7	3.6 ± 0.3
ATF3	9.6 ± 0.5	3.3 ± 0.3

ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ CaF_2 มากขึ้นสมบัติทางกลที่ได้ ทั้งความแข็งแรงต่อการดัดงอ, ความต้านทานการแตกหัก และความแข็งจะมีค่าลดลง และเขาได้ทดสอบการสึกหรอโดยใช้ MRH-3 high speed ring-block tribometer โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนอยู่ที่ 200 ถึง 600 รอบต่อนาที แรงกระทำที่ 70 นิวตัน และจากการทดสอบนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการเติม CaF_2 ลงไปในวัสดุ

นั้นสามารถเป็นสารหล่อลื่นได้จริงจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ลดลงดังได้แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความเร็วรอบการหมุนในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความเร็วรอบการหมุนของวัสดุผสมที่เคลือบ (a) แหวนคาร์ไบด์และ (b) แหวนเหล็กกล้า



รูปที่ 2.14 ภาพจาก SEM ของผิวหน้าที่สึกหรอของวัสดุ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ที่ไม่ได้เติม CaF_2 และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของของชิ้นงานวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ไม่ได้เติม CaF_2 ลงไปนั้นร่องการสึกหรอในภาพได้ถูกரிตลงไป และแสดงลักษณะเหมือนรอยแปรงของเศษการสึกหรอบริเวณผิวหน้าที่สึกหรอ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอเป็นการสึกหรอแบบ abrasive และยังสามารถที่จะสรุปได้ว่าการเติม CaF_2 ลงไปสามารถไปเป็นสารหล่อลื่นได้แต่กลับทำให้อัตราการสึกหรอมีค่าสูงขึ้นจากการที่สมบัติทางกลของวัสดุมีค่าลดลง

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

3.1.1.1 ไขมีดตัด SD1200 ที่ผลิตจากผงเพชรมีขนาดอนุภาค 1200 mesh (ประมาณ 12-18 ไมโครเมตร) โดยใช้โลหะผสมนิกเกิลเป็นตัวประสาน

3.1.1.2 แผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ขนาด 70.71×70.71 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร

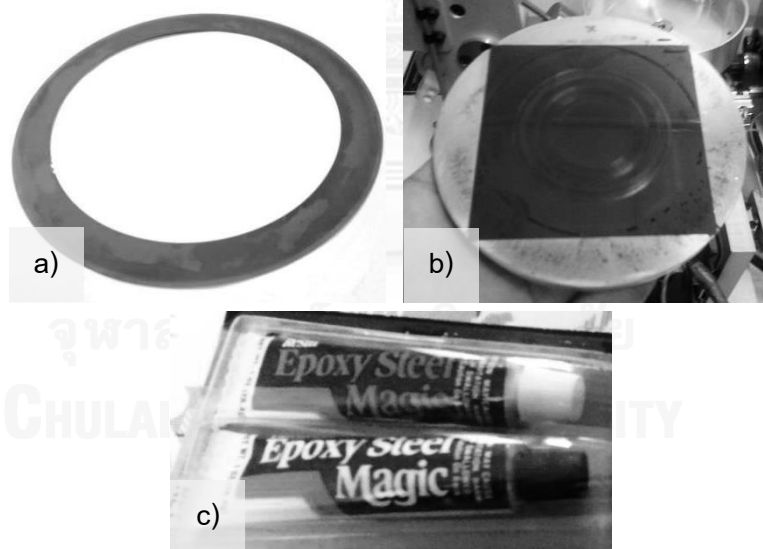
3.1.1.3 แท่งเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร

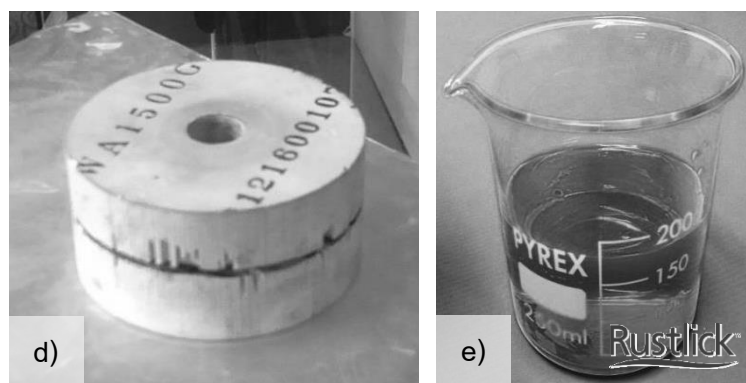
3.1.1.4 กาวอีพอกซี เรซิน ชนิดทนอุณหภูมิสูง ($\approx 149^{\circ}\text{C}$)

3.1.1.5 หินอะลูมินา สำหรับลับคมใบตัดเพชร (alumina dressing stone)

3.1.1.6 สารหล่อเย็น (coolant) Rustlick G-25J

3.1.1.7 น้ำ D.I. (Deionize Water)

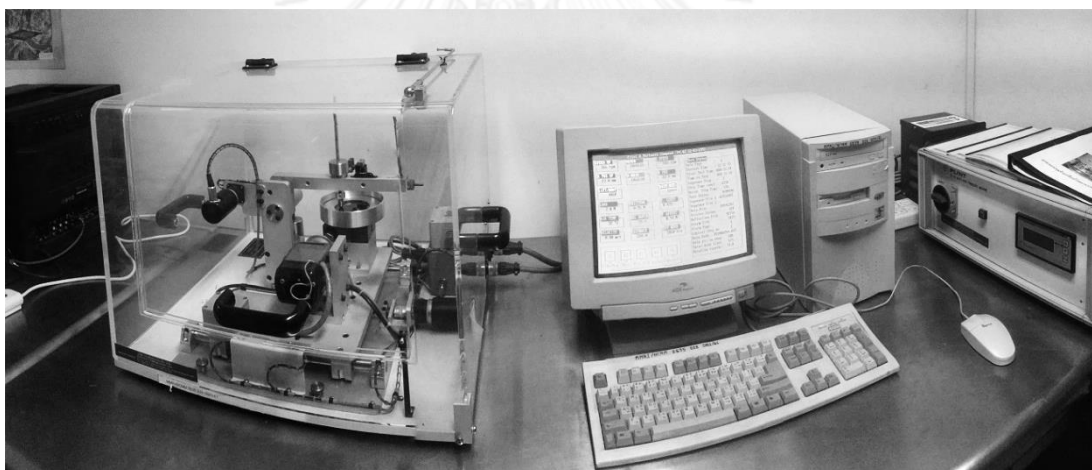




รูปที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบการเลี้ยวเบน โดยในรูป a) ไบมีดตัด SD1200, b) แผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์, c) อีพอกซี เรซิน, d) หินอะลูมินา, e) สารหล่อเย็น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนแบบพินออนดิสก์ (pin-on-disk)



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนแบบพินออนดิสก์ ยี่ห้อ Plint รุ่น TE 79

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ (characterization)

3.1.3.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั้นความละเอียด 4 ตำแหน่ง (analytical balance)

3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง (optical microscope, OM)

3.1.3.3 เครื่องวัดความหยาบผิว (profilometer)

3.1.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

3.1.3.5 เทคนิค energy dispersive spectroscopy (EDS)

3.1.3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)

3.1.3.7 เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction)



รูปที่ 3.3 เครื่องมือพิสูจน์เอกลักษณ์ชนิดต่างๆที่ใช้ได้แก่ a) เครื่องชั่งน้ำหนัก, b) กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง, c) เครื่องวัดความหยาบผิว, d) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ e) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.2 วิธีการทดลอง

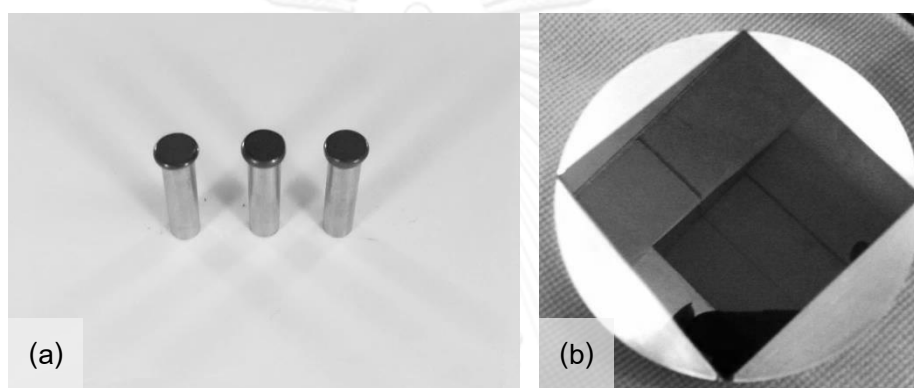
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.1.1 เตรียมชิ้นงานพิน (pin) โดยตัดใบมีดตัดให้ได้วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ติดเข้ากับปลายแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกาวอีพอกซี เรซิน จากนั้นใช้ที่อัดชิ้นงานกดให้ชิ้นไบต์ดแนบสนิทและขนานกับผิวหน้าของแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม

3.2.1.2 เตรียมชิ้นงานดิสก์จากแผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยตัดให้มีขนาด $70.71 \times 70.71 \times 2$ มิลลิเมตร เพื่อที่สามารถนำชิ้นงานใส่ลงไปในห้องใส่ชิ้นงานทดสอบของเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ได้

3.2.1.3 ทำการเปิดคมผิวใบตัดเพชรบนชิ้นงานพิน โดยการนำชิ้นงานพินที่ได้จากข้อ 3.2.1.1 ไปถูกับหินอะลูมินา โดยให้แรงกดคงที่เท่ากับ 0.294 นิวตัน เป็นระยะทาง 3.77 เมตร ด้วยความเร็วเชิงเส้น 0.15 เมตรต่อวินาที และหล่อลื่นด้วยน้ำ

3.2.1.4 เตรียมสารหล่อเย็นที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ โดยผสม Rustlick G-25J เข้ากับน้ำ D.I. ในอัตราส่วน 1 ต่อ 20 ส่วนตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการสึกหรอ (a) ชิ้นงานพินหลังจากตัดใบตัดเรียบร้อยแล้ว, (b) แผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่ตัดแล้ว และวางอยู่บนแผ่นรองชิ้นงานดิสก์

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอ

3.2.2.1 นำชิ้นงานพินและชิ้นงานดิสก์ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมเรียบร้อยแล้วไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบการสึกหรอ และเทสารหล่อเย็นที่ผสมน้ำ D.I. แล้วใส่เข้าไปในจานจับชิ้นงานดิสก์

3.2.2.2 ตั้งค่าสภาวะการทดสอบ โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ คือ ค่าความเร็วเชิงเส้นคงที่เป็น 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตรต่อวินาที น้ำหนักกด 10, 15 และ 20 N ระยะทางการขัดสีเป็น 1000, 3000 และ 5000 เมตร

3.2.2.3 สั่งให้เครื่องเริ่มการทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ข้างต้น และระหว่างนั้นเครื่องจะทำการเก็บข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) ทุกๆ 1 วินาที ซึ่งสามารถคำนวณเป็นระยะทางการขัดสีได้จากความเร็วเชิงเส้นที่เรากำหนดไว้สำหรับสภาวะการทดสอบนั้นๆ

3.2.3 ขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์

3.2.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีในวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิค EDS

3.2.3.2 ตรวจสอบวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปของทั้งชิ้นงานพินและชิ้นงานดิสก์ ภายหลังจากที่ได้ทดสอบการสึกหรอแล้ว โดยนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของร่องการสึกหรอ (wear track) ของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ หลังจากได้ทดสอบการสึกหรอ

3.2.3.4 ตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไบมีตต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของไบมีตต์หลังการทดสอบการสึกหรอโดยใช้เทคนิค EDS

3.2.3.5 ตรวจสอบเนื้อวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอ (wear debris) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และตรวจสอบชนิดและลักษณะความเป็นผลึกของเนื้อวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน

3.2.3.6 ตรวจสอบลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์การทดลอง

3.2.4.1 วิเคราะห์ผลของความเร็วการขัดสี ระยะทางการขัดสี และแรงกระทำที่มีต่อลักษณะการสึกหรอ (wear mode) ที่เกิดขึ้น โดยอาศัย ค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะ (specific wear rate) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและปริมาตรการสึกหรอ (wear volume) และเนื้อวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอ

3.2.4.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เมื่อผ่านการขัดสีภายใต้สภาวะต่างๆ

3.2.4.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของไบมีตต์เมื่อผ่านการขัดสีภายใต้สภาวะต่างๆ

บทที่ 4

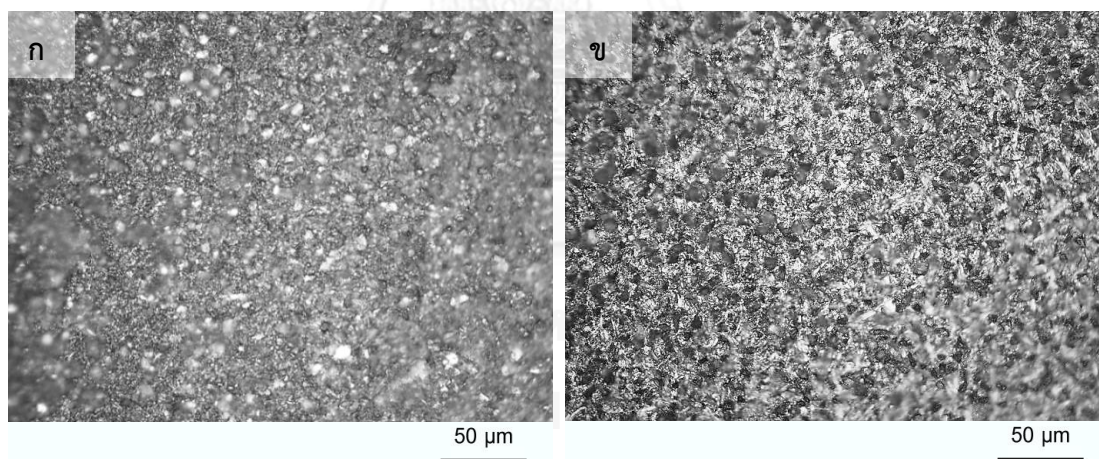
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการขัดสีระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานพินกับหินอะลูมินาก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอ

หลังจากที่ติดแผ่นใบตัดเพชร (diamond slicing blade) ลงบนแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกาวอีพอกซีเรซินเรียบร้อยแล้ว ยังไม่สามารถนำชิ้นงานพินไปทำการทดสอบการสึกหรอได้ทันที เพราะว่ามีผิวหน้าของใบตัดบนชิ้นงานพินนั้นยังไม่ได้ทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด (dressing) จึงต้องนำไปถู/ขัดสีกับหินอะลูมินาเสียก่อนโดยในงานนี้ได้กำหนดสภาวะสำหรับการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดไว้ที่ความเร็วเชิงเส้น 0.15 เมตรต่อวินาที, ระยะทางไกล 3.77 เมตร และน้ำหนักกด 0.294 นิวตัน

4.1.1 ผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานพิน

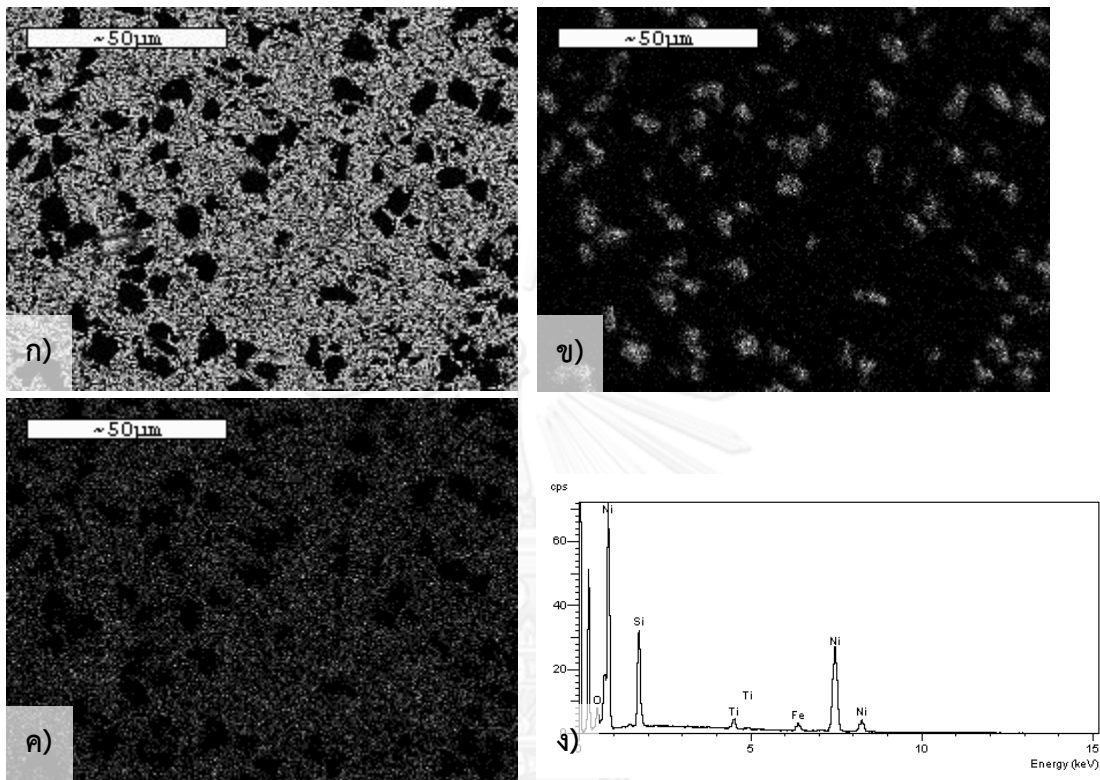
หลังจากที่นำชิ้นงานพินไปทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสง ผลที่ได้คือหลังจากที่ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดแล้ว ปริมาณเม็ดเพชรต่อพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผิวหน้าใบตัดได้ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดแล้ว และเปรียบเทียบกับผิวหน้าของใบตัดที่ยังไม่ได้ผ่านการขัดสีกับหินอะลูมินา ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 (ก,ข)



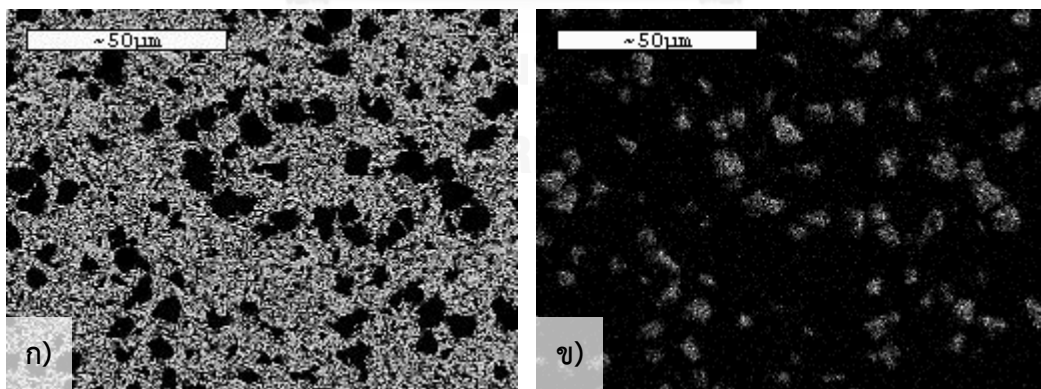
รูปที่ 4.1 ภาพโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าใบตัดเพชรที่อยู่บนชิ้นงานพินซึ่ง ก) ยังไม่ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด ข) ผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดแล้วภายใต้สภาวะที่กำหนด ทั้งสองรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า

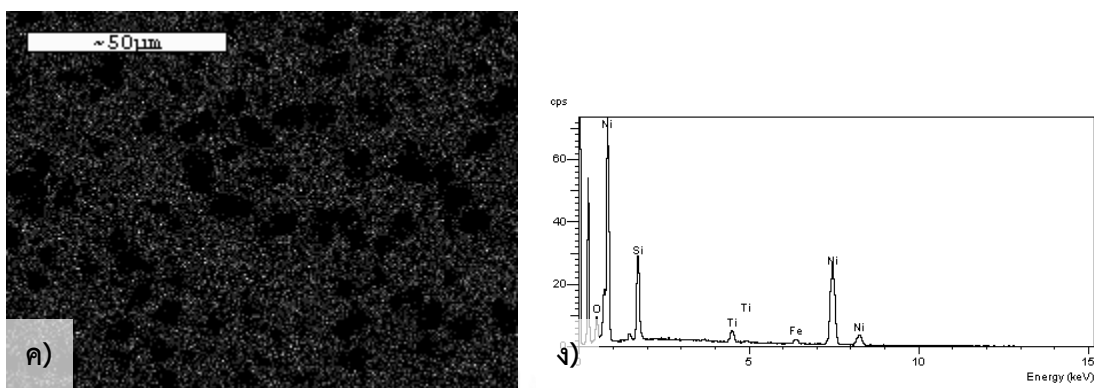
ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าใบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้โหมด back scatter electron และตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของผิวหน้าใบตัดบนชิ้นงานพินก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด โดยได้ใช้เทคนิค EDS (energy dispersive spectroscope) ในการทำ mapping เพื่อที่จะสามารถบอกได้ว่าที่แต่ละตำแหน่งบน

ผิวหน้าของไบตัดนั้นประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง โดยผลของการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบทั้งก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวไบตัดแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของไบมีดตัดก่อนการเปิดคมผิว ก) ภาพถ่าย SEM ในโหมด back scatter electron, ข) บริเวณที่มีธาตุ C อยู่, ค) บริเวณที่มีธาตุ Ni อยู่ และ ง) แผนภูมิแสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบในบริเวณที่ตรวจสอบนี้





รูปที่ 4.3 ผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของไบมัดตัดหลังการเปิดคมผิว ก) ภาพถ่าย SEM ในโหมด back scatter electron, ข) บริเวณที่มีธาตุ C อยู่, ค) บริเวณที่มีธาตุ Ni อยู่ และ ง) แผนภูมิแสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบในบริเวณที่ตรวจสอบนี้

จากรูปที่ 4.2 ก) และ 4.3 ก) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าไบมัด ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวไบมัดพบลักษณะมีเฟสสีดำกระจายตัวอยู่ในเฟสเนื้อพื้นสีขาว และเมื่อดูในรูป 4.2 ข, ค) และ 4.3 ข, ค) จะได้ว่าเฟสสีดำมีธาตุ C เป็นองค์ประกอบหลักจึงแสดงว่าเป็นเฟสของเม็ดเพชรและเฟสสีขาวมีธาตุ Ni เป็นองค์ประกอบหลักจึงแสดงว่าเป็นเฟสของเนื้อพื้นโลหะ และได้ทำการวัดขนาดของเฟสสีดำด้วยโปรแกรม ImageJ รุ่น 1.46r ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ ผ.1 พบว่าก่อนการเปิดคมเม็ดเพชรมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 6.2 ไมครอน และหลังการเปิดคมเม็ดเพชรมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 6.5 ไมครอน ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

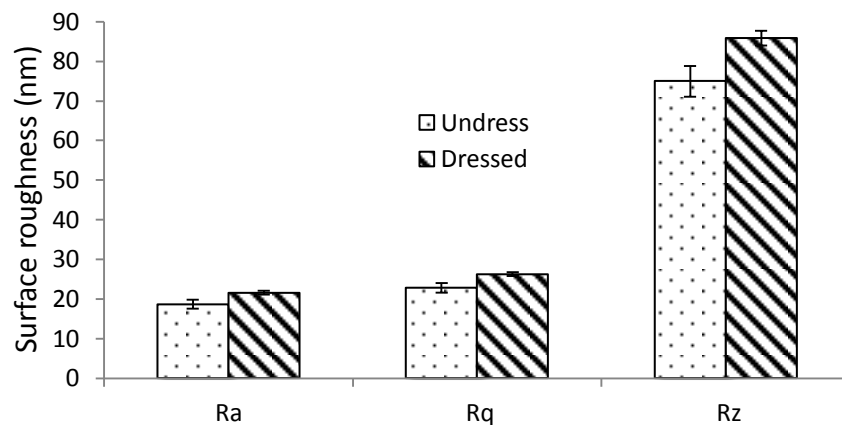
ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละโดยอะตอมของธาตุองค์ประกอบที่ตรวจสอบก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวไบมัด

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอม	
	ก่อนเปิดคมผิวไบมัด	หลังเปิดคมผิวไบมัด
C	76.75	75.94
O	14.31	15.59
Si	2.56	2.25
Ti	0.29	0.36
Fe	0.29	0.20
Ni	5.79	5.67

ค่าร้อยละโดยอะตอมของธาตุองค์ประกอบของผิวหน้าไบมัดที่ได้ตรวจสอบก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวไบมัดจากกราฟในรูปที่ 4.2 ง) และ 4.3 ง) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าร้อยละโดยอะตอมของธาตุองค์ประกอบต่างๆแล้วมีค่าใกล้เคียงกันในทุกธาตุองค์ประกอบที่ได้ตรวจสอบทั้งก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวไบมัด อาจบอกได้ว่าไม่แตกต่างกัน

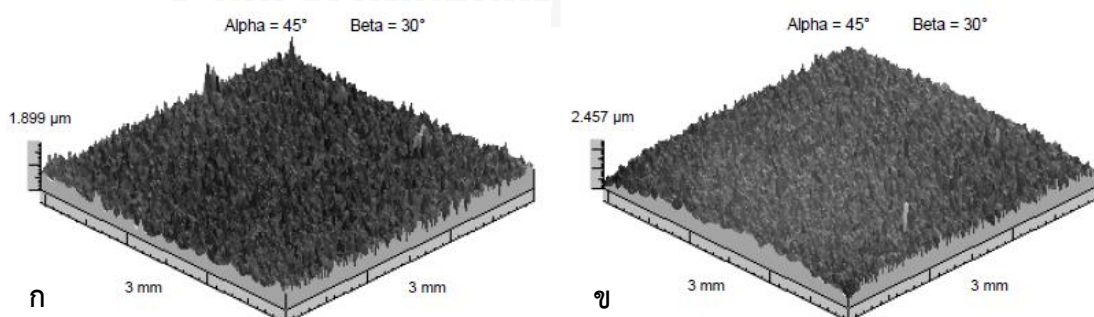
4.1.2 ผลกระทบที่มีต่อค่าความหยาบผิวของผิวหน้าชิ้นงานพิน

ตรวจสอบค่าความหยาบผิวของผิวหน้าชิ้นงานพินทั้งก่อนและหลังจากเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด ด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิววัสดุ โดยค่าความหยาบผิวที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (average surface roughness, R_a), ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square roughness, R_q), ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดสิบจุด (ten-point height roughness, R_z) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความหยาบผิวหน้าของใบตัดก่อนและหลังทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด

จากรูปที่ 4.4 เมื่อใบตัดผ่านการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดแล้วทำให้มีค่าความหยาบผิวทั้งสามแบบเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดสิบจุดมีค่าสูงกว่ามาก การที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีค่าต่างกับค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุดมากนั้นแสดงให้เห็นว่ามีจุดที่เป็น peak to valley สูงๆ จำนวนน้อยกว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ที่ทำการวัดค่า ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่มีเม็ดเพชรไหลขึ้นมาบนผิวหน้าของใบตัด โดยภาพผิวหน้าของใบตัดที่ได้ทำการวัดค่าแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนผิวหน้าของใบตัด a) ก่อน และ b) หลัง ทำการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัด

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทางสถิติของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวหน้าชิ้นงานพินก่อนและหลังขัดสีกับหินอะลูมินา

ชิ้นงานทดสอบ	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a)			
	น้อยที่สุด (nm)	เฉลี่ย (nm)	มากที่สุด (nm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (nm)
ก่อนขัดสีกับหินอะลูมินา	15.32	18.65	21.27	1.09
หลังขัดสีกับหินอะลูมินา	20.50	21.59	22.79	0.46

จากตารางที่ 4.2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวหน้าชิ้นงานพินเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังจากที่นำไปขัดสีกับหินอะลูมินาแล้วนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งค่าค่าน้อยที่สุด, ค่าเฉลี่ย และค่ามากที่สุด ถ้าพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจะเห็นได้ว่าหลังการขัดสีมีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 18.65 nm ไปเป็น 21.59 nm นั่นคือผิวหน้าของใบตัดเพชรที่ติดอยู่บนชิ้นงานพินหลังจากการขัดสีนั้นมีความหยาบเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ย 2.94 nm ซึ่งได้สอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.1 และเป็นที่ยืนยันว่าหลังจากการนำชิ้นงานพินไปขัดสีกับหินอะลูมินาแล้วสามารถกำจัดเนื้อพื้นโลหะผสม निकิลและทำให้เม็ดเพชรปรากฏขึ้นมาอยู่บริเวณผิวหน้าได้มากขึ้นจริง โดยที่ไม่ได้ถูกขัดให้เรียบไปกับผิวเนื้อพื้นอีก และจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังผ่านการขัดสีมาแล้วนั้นมีค่าลดลงจาก 1.09 nm ไปเป็น 0.46 nm ซึ่งการลดลงของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้แสดงว่าเราสามารถควบคุมค่าความหยาบผิวของผิวหน้าใบตัดเพชรบนชิ้นงานพินให้อยู่ในช่วงที่ควบคุมได้เป็นอย่างดีด้วยวิธีการเปิดคมเม็ดเพชรผิวใบตัดนี้ที่เลือกมาใช้ในการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานพินก่อนที่จะนำไปทดสอบการสึกหรอต่อไป

4.2 ผลของการขัดสีระหว่างใบตัดเพชรและวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ในงานนี้เราได้เลือกการทดสอบการสึกหรอโดยเทคนิค pin-on-disk มาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมหรือสิ่งที่เกิดขึ้นทั้งในระหว่างและจากการขัดสีกันของวัสดุทั้งสองชนิดนั้นคือ ใบตัดเพชร (ผิวหน้าของชิ้นงานพิน) กับวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (ชิ้นงานดิสก์) ภายใต้สภาวะการทดสอบที่ได้กำหนดและกล่าวไว้ในขอบเขตการศึกษาข้างต้น และผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้ในด้านต่างๆมีดังต่อไปนี้

4.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ในระหว่างที่ทำการทดสอบการสึกหรอนั้นเครื่อง pin-on-disk ได้มีการเก็บบันทึกค่าของแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างการขัดสีของผิวสัมผัสทั้งสอง โดยใช้เซ็นเซอร์วัดค่าแรงต้านที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับผิวสัมผัสทั้งสอง (tangential force, F) จากนั้นนำค่าของแรงที่ได้มาหารด้วยแรงกดที่

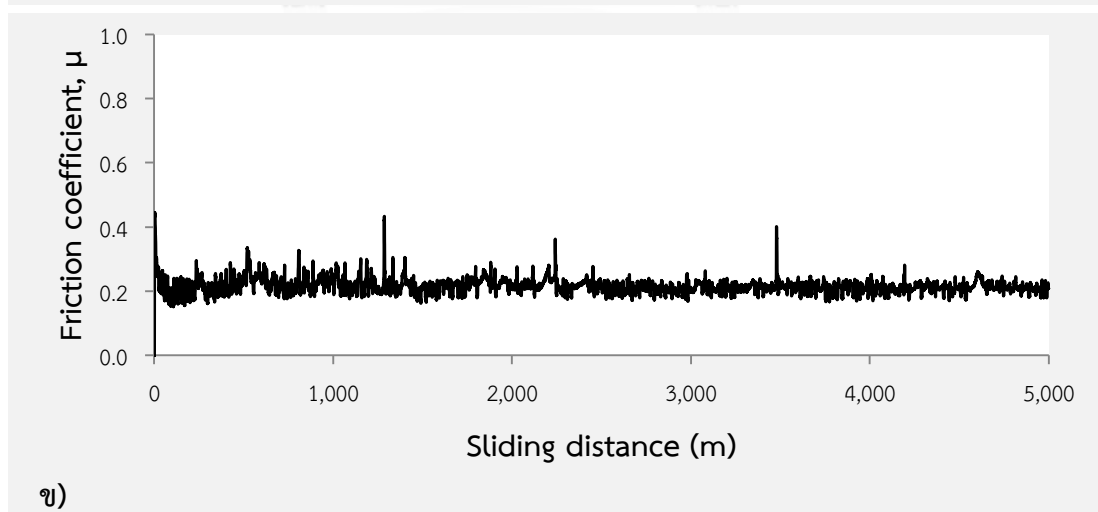
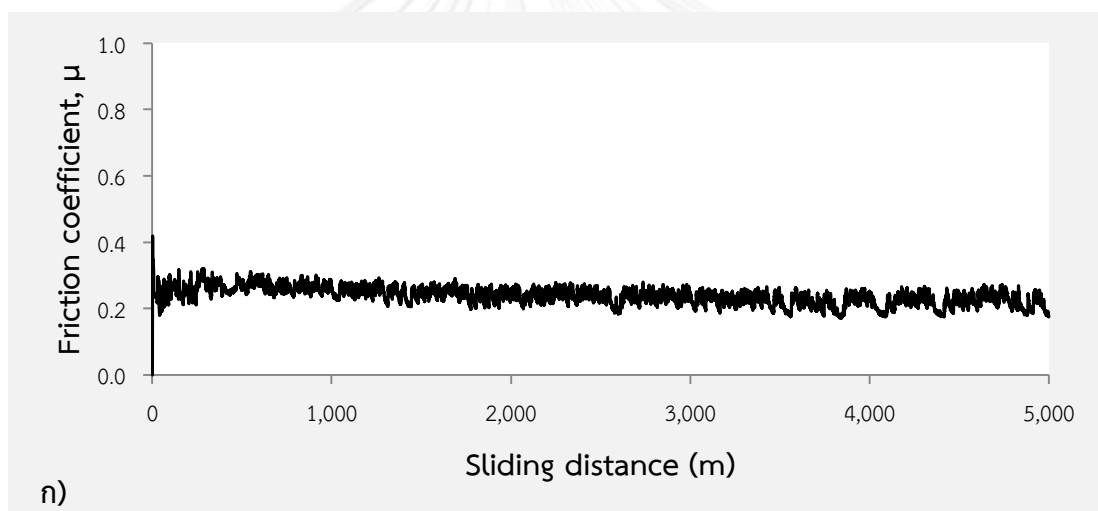
ให้ในทิศตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal force, N) จึงได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient, μ) ตามสมการที่ 4.1

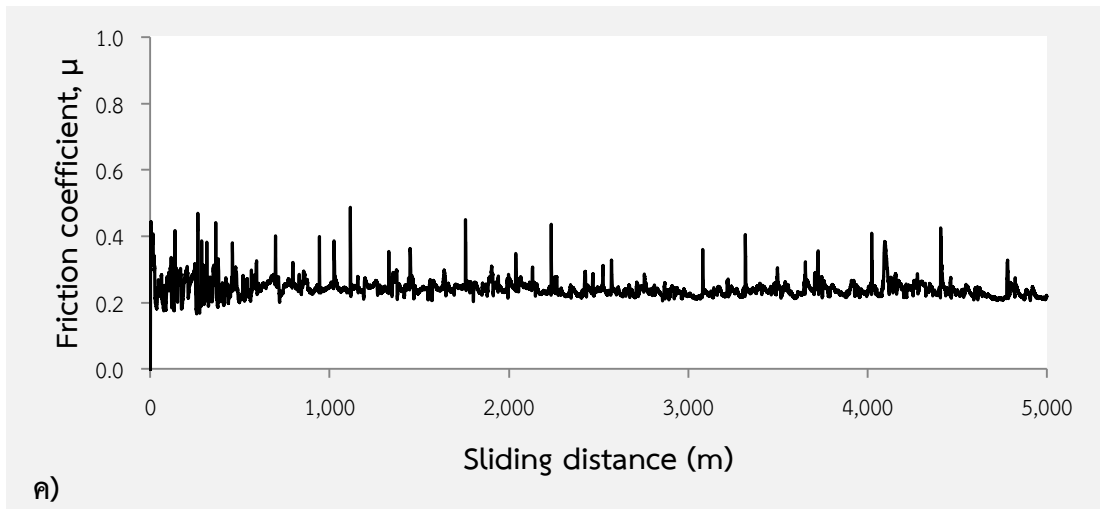
$$\mu = F/N \quad (4.1)$$

และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมาหนึ่งค่าเมื่อเวลาของการทดสอบการลื่นหรือผ่านไปทุกๆหนึ่งวินาที (testing time, t) ซึ่งสามารถนำเวลาที่ผ่านไปนั้นมาคูณกับค่าความเร็วไถลเชิงเส้น (linear sliding speed, S) ที่ได้กำหนดไว้สำหรับสถานะการทดสอบการลื่นนั้นๆแล้วจะได้เป็นค่าระยะทางไถล (sliding distance, L) ที่ผ่านไป ตามจากสมการที่ 4.2

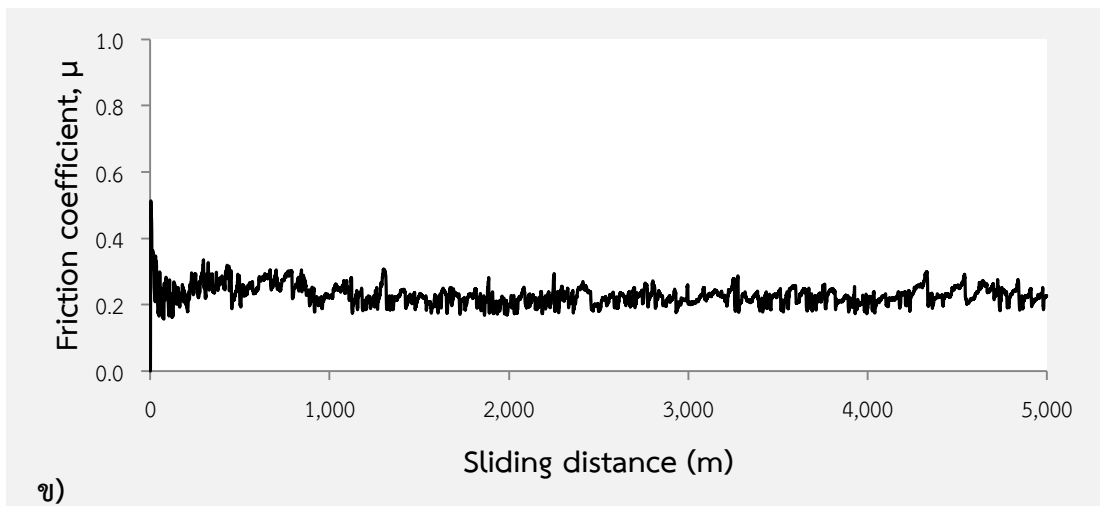
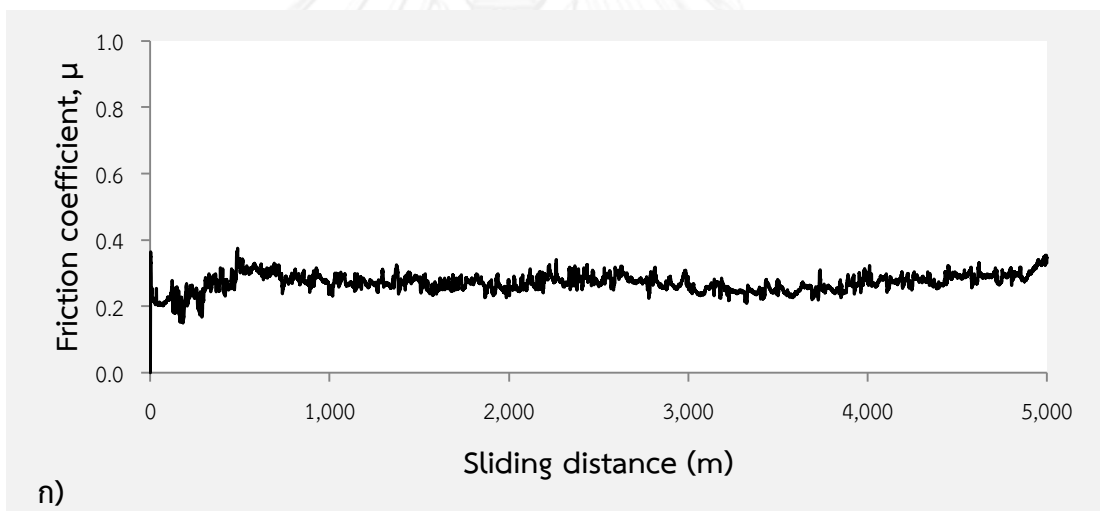
$$L = S \cdot t \quad (4.2)$$

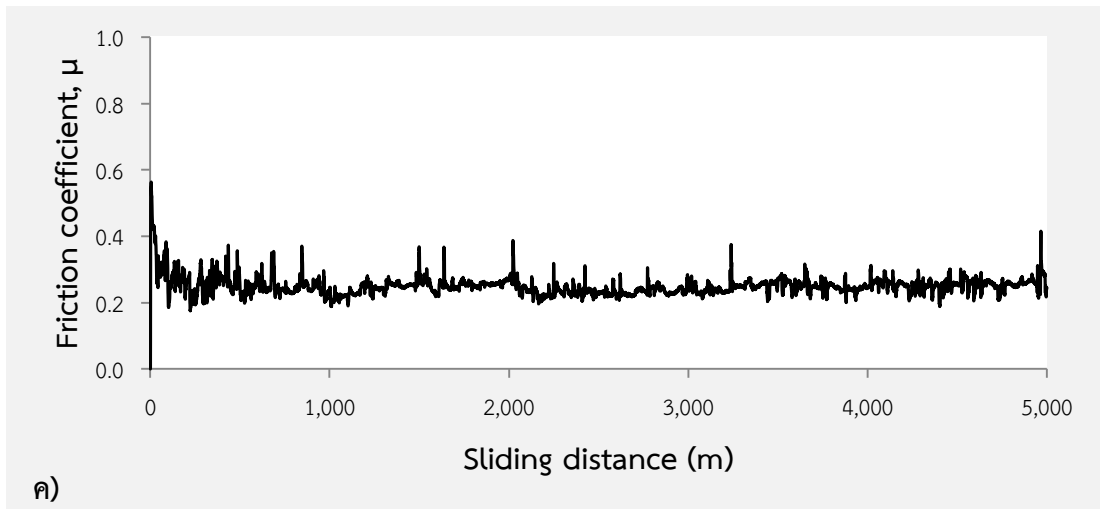
จากนั้นเราจึงสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการขัดสีมาแสดงในรูปแบบแผนภูมิเทียบกับระยะทางไถลที่ผ่านไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



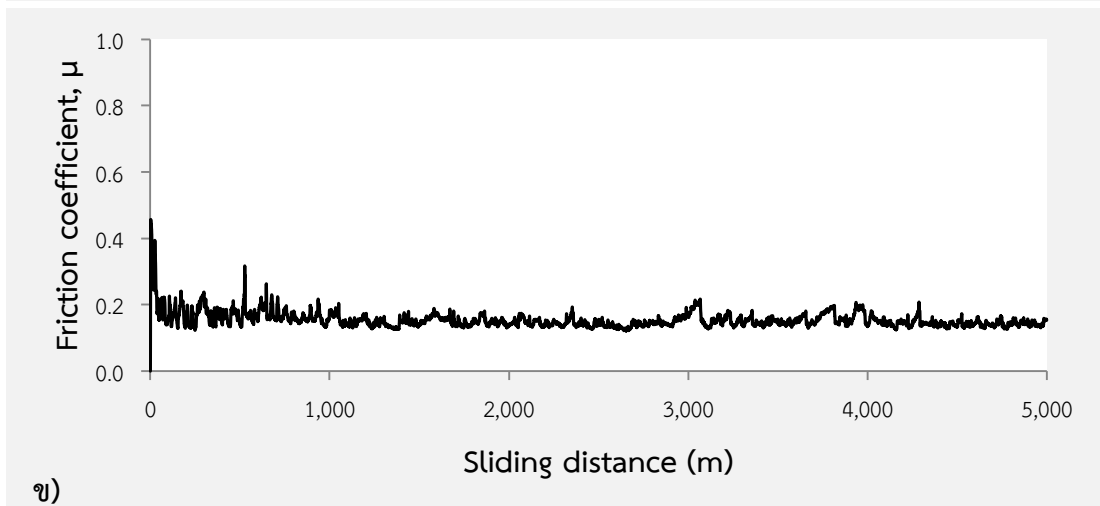
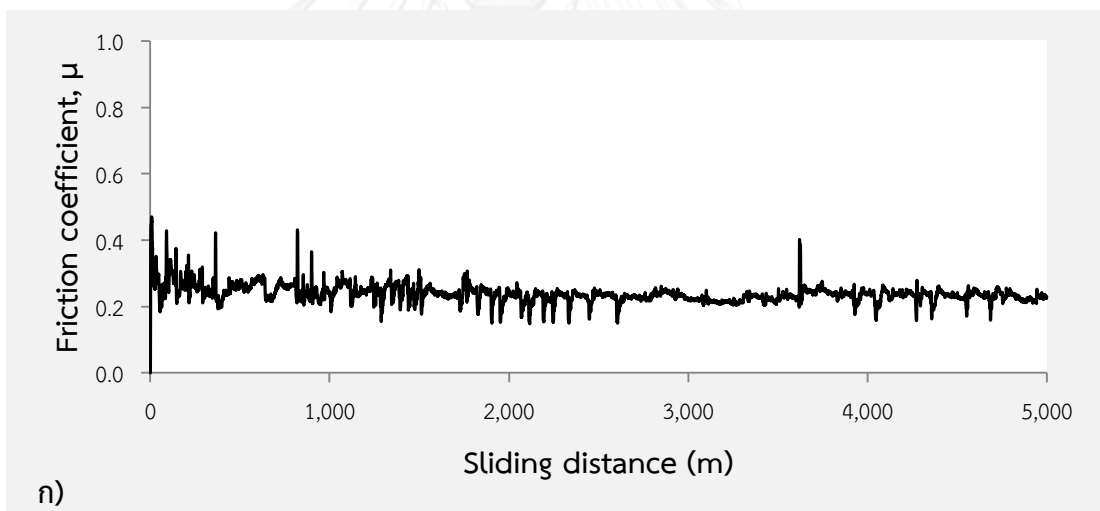


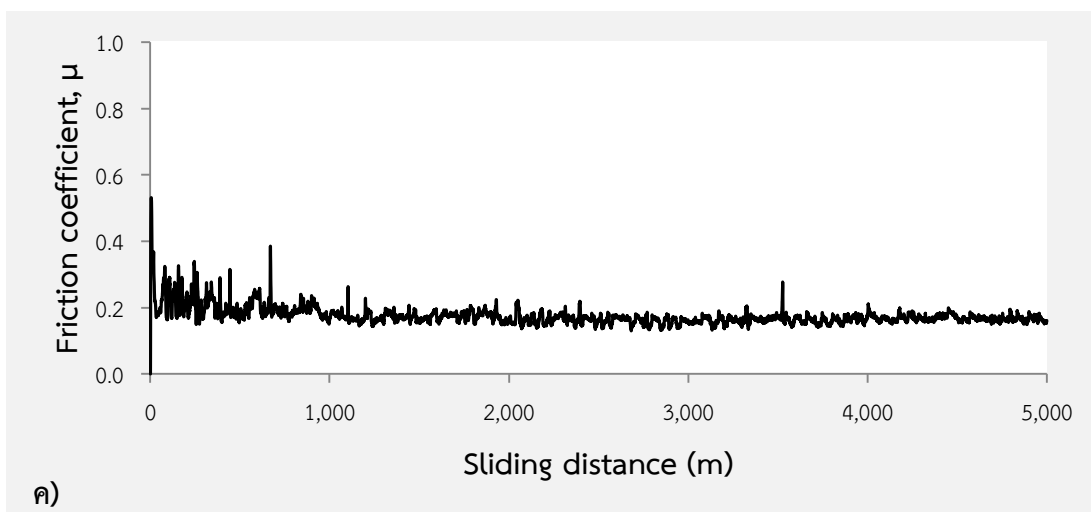
รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสึกหรอโดยใช้ความเร็วไกลเชิงเส้นที่ 0.2 เมตรต่อวินาที และระยะทางไกลผ่านไป 5000 เมตร โดยที่แรงกดที่ให้เป็น ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน ตามลำดับ





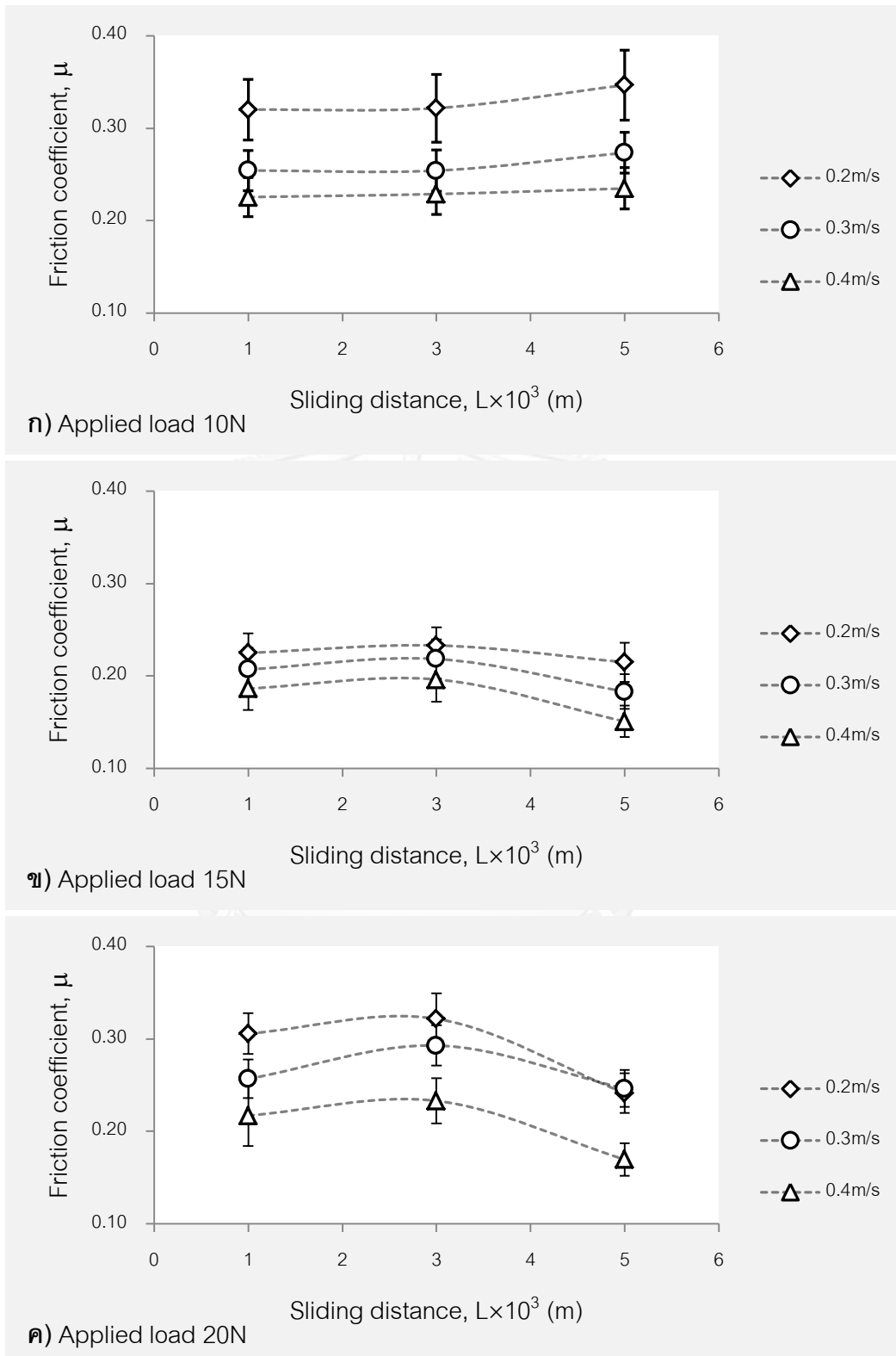
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสีกหรือโดยใช้ความเร็ว ไกลเชิงเส้นที่ 0.3 เมตรต่อวินาที และระยะทางไกลผ่านไป 5000 เมตร โดยที่แรงกดที่ให้เป็น ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน ตามลำดับ





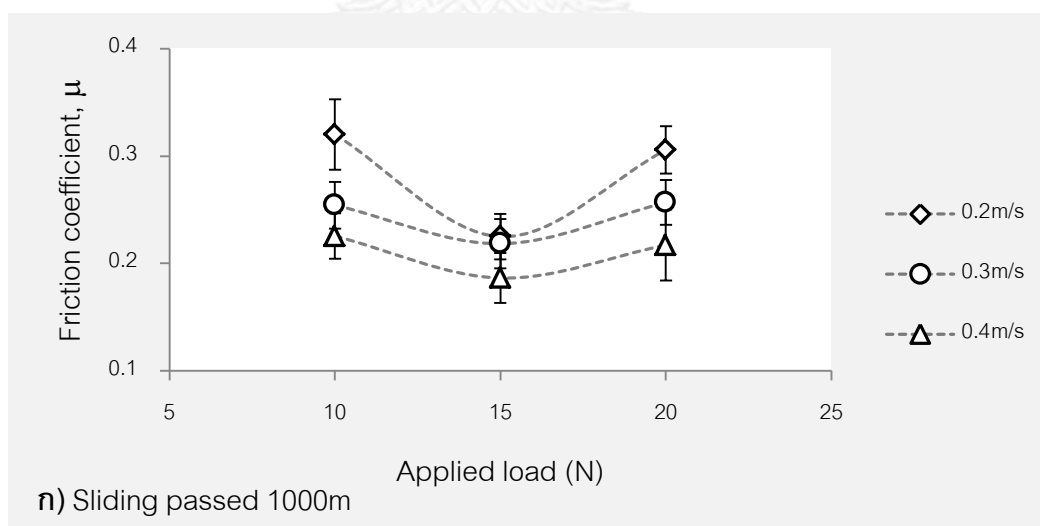
รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะทดสอบการสึกหรอโดยใช้ความเร็วไถลเชิงเส้นที่ 0.4 เมตรต่อวินาที และระยะทางไถลผ่านไป 5000 เมตร โดยที่แรงกดที่ให้ เป็น ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน ตามลำดับ

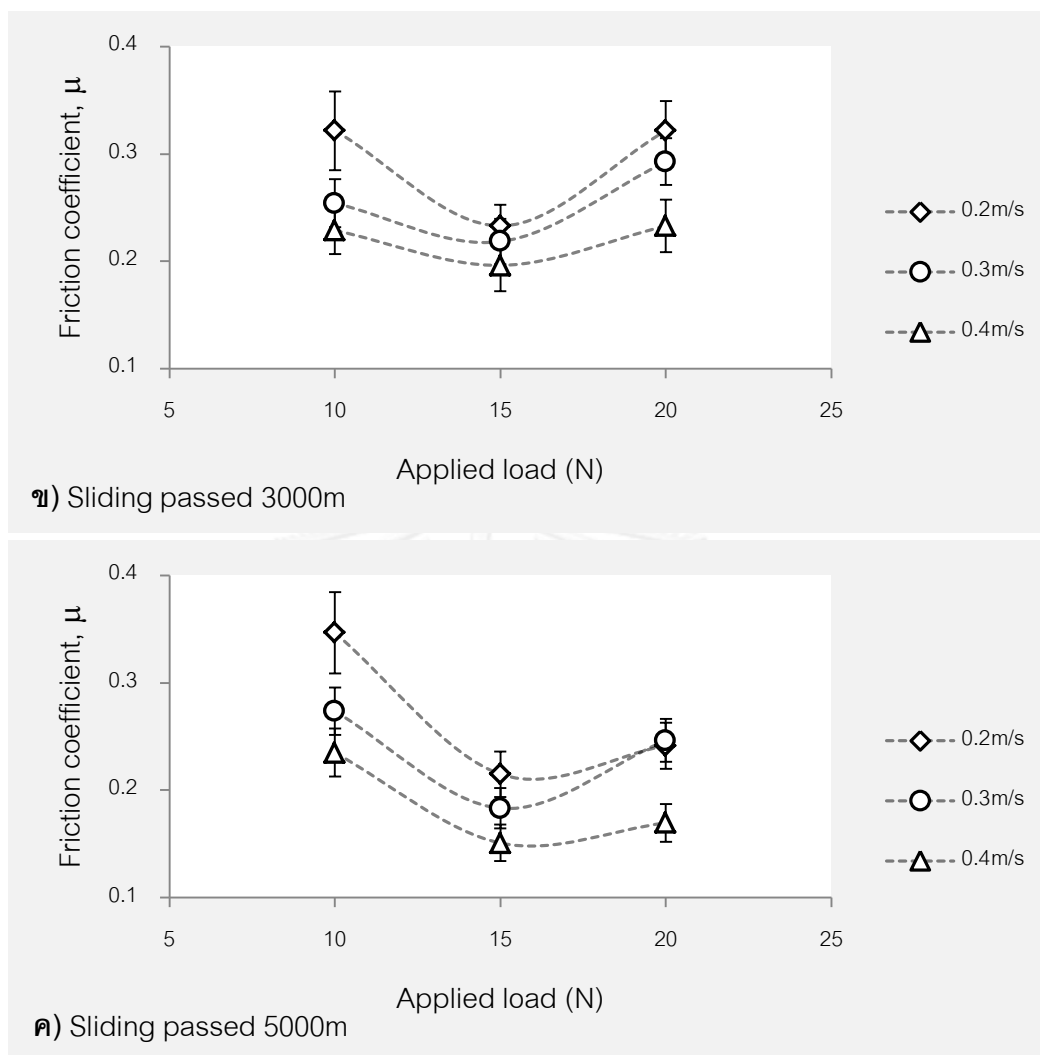
จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอ สังเกตเห็นได้ว่าในช่วงประมาณ 500 เมตรแรกเส้นกราฟมีลักษณะแกว่งตัวในช่วงกว้างเนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ซึ่งเป็นการยากที่จะบอกว่าในช่วง 500 เมตรแรกของการทดสอบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นเท่าใด และแตกต่างจากช่วงที่ระยะทางไถลมากกว่า 500 เมตรไปแล้ว เส้นกราฟมีลักษณะแกว่งตัวน้อยกว่าเนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวน้อยกว่าในช่วงแรก ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าทางสถิติของข้อมูลในแต่ละสภาวะการทดสอบการสึกหรอที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ ผ.2 จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตลอดระยะทางไถลของสภาวะการทดสอบนั้นๆจะอยู่ในช่วง 0.056 ถึง 0.023 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 24.2 ถึง 9.8 ของค่าเฉลี่ย และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางสถิติของข้อมูลในช่วงระยะทางไถลมากกว่า 500 เมตรแล้ว เป็นผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงไปอยู่ในช่วง 0.038 ถึง 0.017 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15.3 ถึง 7.3 ของค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ลดลงจากการไม่ได้นำข้อมูลในช่วงระยะทางไถล 500 เมตรแรกมาคิด ทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงเห็นสมควรที่จะตัดข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในส่วนแรกของระยะทางไถล 500 เมตรแรกออกไม่ได้นำมาคิดค่าทางสถิติด้วย ในส่วนของค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ตรวจวัดได้จากแต่ละสภาวะการทดสอบการสึกหรอนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วไถเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อระยะทางไถเปลี่ยนแปลงไป โดยแรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน

จากรูปที่ 4.9 ก), ข) และ ค) เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไกลเชิงเส้นกับแรงกดที่ให้มีต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สามารถสังเกตได้ว่าแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ (ที่ความเร็วไกลเชิงเส้นและแรงกดที่ให้ค่าหนึ่งๆ) แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางไกลที่เพิ่มขึ้นจาก 1000, 3000 และ 5000 เมตร ตามลำดับ ถ้าพิจารณาจากเส้นแนวโน้มของแต่ละสภาวะการทดสอบจะสามารถแบ่งได้เป็นพฤติกรรมสองแบบคือ แบบที่หนึ่งในรูปที่ 4.9 ก) แรงกดที่ให้เท่ากับ 10 นิวตัน สำหรับทุกๆความเร็วไกลเชิงเส้นที่ทดสอบ เส้นแนวโน้มมีลักษณะเป็นโค้งหงาย นั่นคือเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะทางไกลที่ทดสอบ เนื่องจากภาระกรรมทางกลต่ำ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของผิวสัมผัสมีน้อย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.226 ถึง 0.347 และแบบที่สองรูปที่ 4.9 ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน แสดงเส้นแนวโน้มที่มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ นั่นคือเมื่อระยะทางไกลเพิ่มจาก 1000 ไป 3000 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นเป็น 5000 เมตร แล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงและมีค่าต่ำกว่าที่ 1000 เมตร โดยที่ 15 นิวตัน มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.151 ถึง 0.233 และที่ 20 นิวตันมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.170 ถึง 0.322 เมื่อพิจารณาถึงช่วงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แตกต่างกันในแต่ละแรงกดที่ให้นี้แล้วจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีที่ให้แรงกด 20 นิวตันอยู่กึ่งกลางระหว่างกรณี 10 และ 15 นิวตัน โดยสามารถแสดงในรูปกราฟของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อระยะทางไกลเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.10

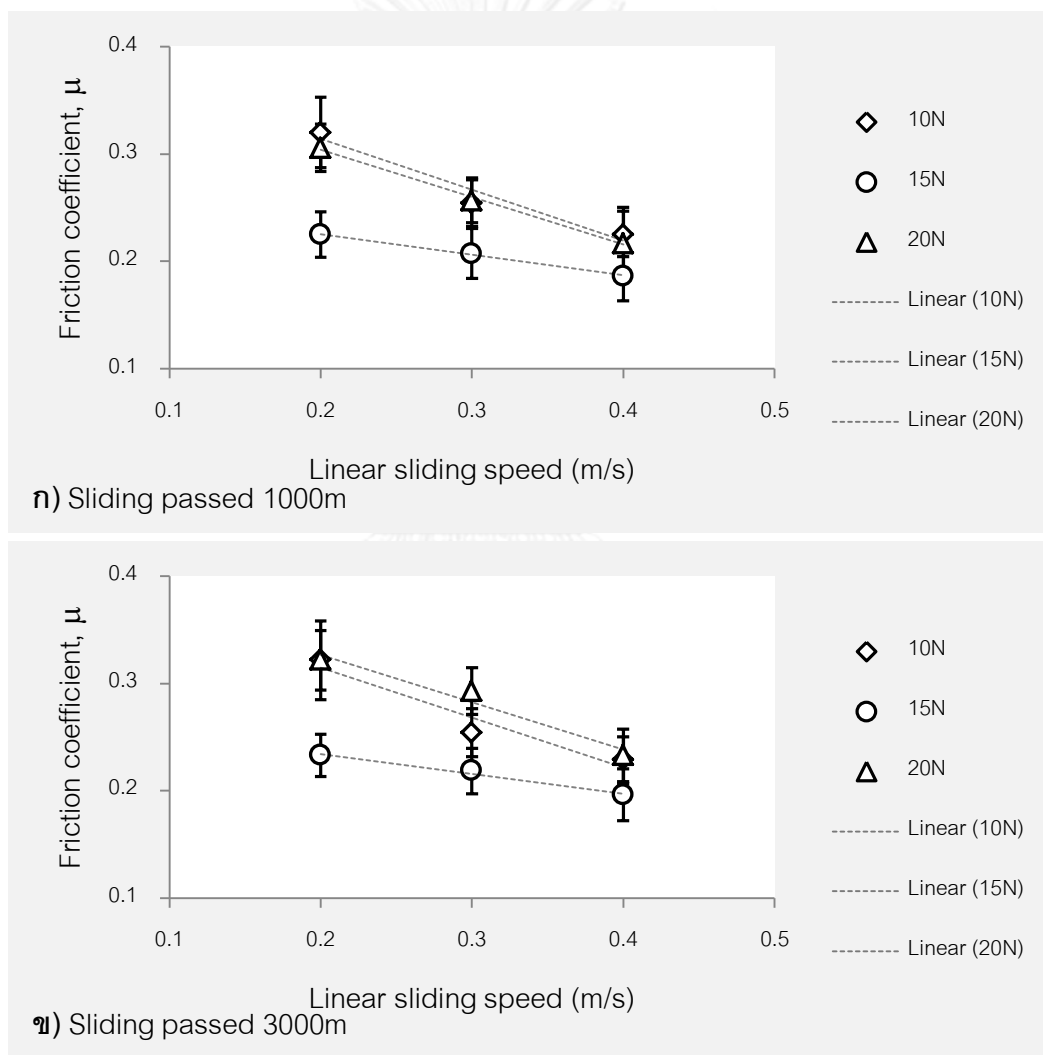


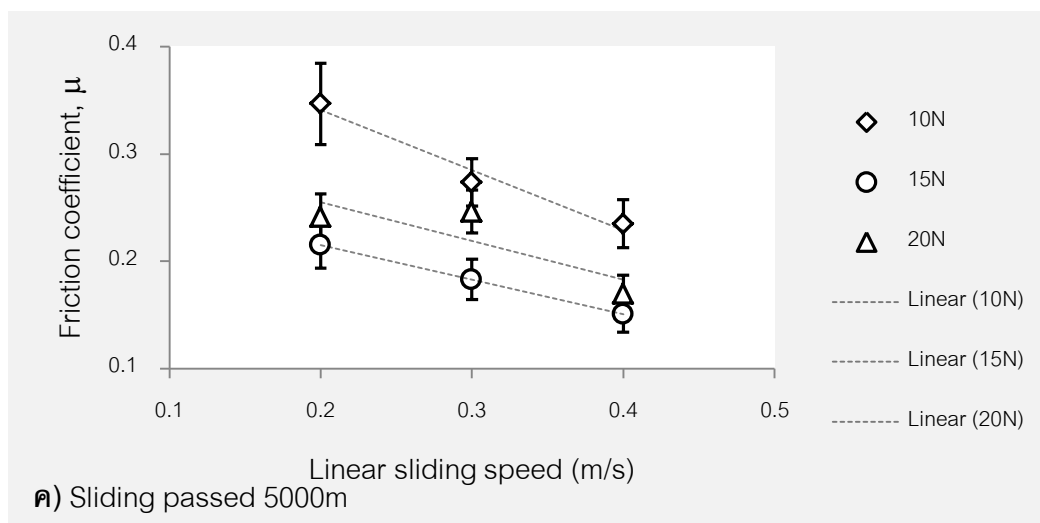


รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วไกลเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อแรงกระทำที่ให้เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ผ่านระยะทางไกลไปแล้ว ก) 1000 เมตร ข) 3000 เมตร และ ค) 5000 เมตร

จากรูปที่ 4.10 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าทุกระยะทางไกลที่ทดสอบคือ 1000, 3000 และ 5000 เมตร และทุกความเร็วไกลเชิงเส้น เมื่อแรงกดที่ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 นิวตัน แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง ซึ่งอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้มีค่าน้อยลงเมื่อความเร็วไกลเชิงเส้นมีค่ามากขึ้นจาก 0.2, 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ โดยสามารถพิจารณาได้จากความชันของเส้นแนวโน้มที่อยู่ระหว่างแรงกดที่ให้ 10 นิวตันกับแรงกดที่ให้ 15 นิวตัน สภาวะที่ระยะทางไกลผ่านไป 1000 และ 3000 เมตรในรูป 4.10 ก) และ ข) นั้นมีอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใกล้เคียงกันและน้อยกว่าในสภาวะที่ระยะทางไกลผ่านไป 5000 เมตรในรูป 4.10 ค) ซึ่งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้แสดงไว้ในตารางที่ ผ.3 ในรูปของค่าความชันของเส้นแนวโน้มจากแผนภูมิในรูปที่ 4.10 จากนั้นพิจารณาเมื่อให้แรงกดเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20 นิว

ต้น แล้วสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับสถานะที่ให้แรงกด 10 นิวตัน ในกรณีที่ระยะทางไกลผ่านไปแล้ว 1000 และ 3000 เมตร แต่ในกรณีที่ระยะทางไกลผ่านไปแล้ว 5000 เมตร ก็มีการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเช่นเดียวกันแต่มีอัตราน้อยกว่ามาก และเมื่อพิจารณาทั้ง 3 แรงกดที่ให้ในรูปที่ 4.10 นั้นเห็นได้ชัดเจนว่าที่ 15 นิวตันนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความชันของเส้นแนวโน้มซึ่งสิ่งนี้แสดงว่าที่ 15 นิวตันนั้นน่าจะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกในการสึกหรอขึ้น โดยจะต้องพิจารณากับผลการทดลองในด้านอื่นประกอบกันและจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป





รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของแรงกดที่ให้ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ผ่านระยะทางไถลไปแล้ว ก) 1000 เมตร ข) 3000 เมตร และ ค) 5000 เมตร

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วไถลเชิงเส้นที่ทุกแรงกดที่ให้ (10, 15 และ 20 นิวตัน) ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นแนวโน้มในแผนภูมिरูปที่ 4.11 ก), ข) และ ค) มีความชันเป็นค่าลบ นั่นคือเมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วเห็นผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลง โดยการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นเพิ่มขึ้นนี้น่าจะเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ hydrodynamics lubrication [12] ของสารหล่อเย็นซึ่งถูกใส่เข้าไปอยู่ในระบบของการทดสอบการสึกหรอนี้ด้วย โดยเมื่อเกิดการไถลระหว่างคู่มือสัมผัสแล้วทำให้สารหล่อเย็นซึ่งเป็นของเหลวก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มหล่อลื่นขึ้นระหว่างคู่มือสัมผัส และเมื่อความเร็วไถลเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.2 ไปเป็น 0.4 เมตรต่อวินาทีเป็นผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการหล่อลื่นจึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นจากการที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นเพิ่มสูงขึ้นในรูปที่ 4.11

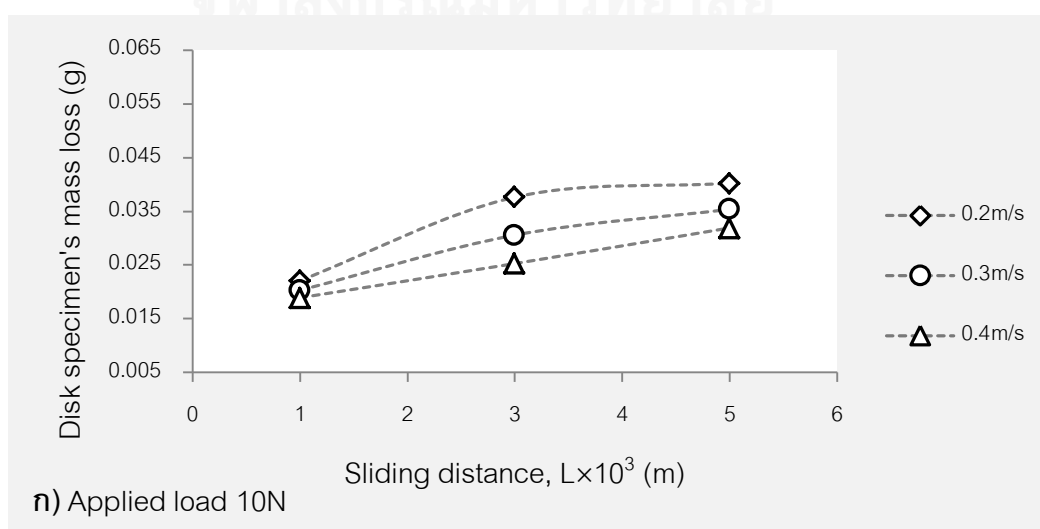
4.2.2 มวลของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

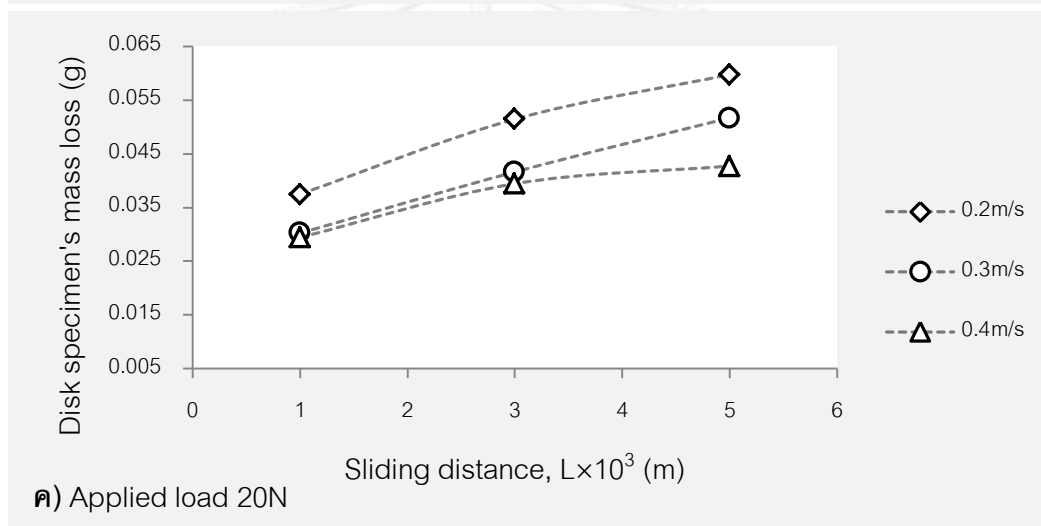
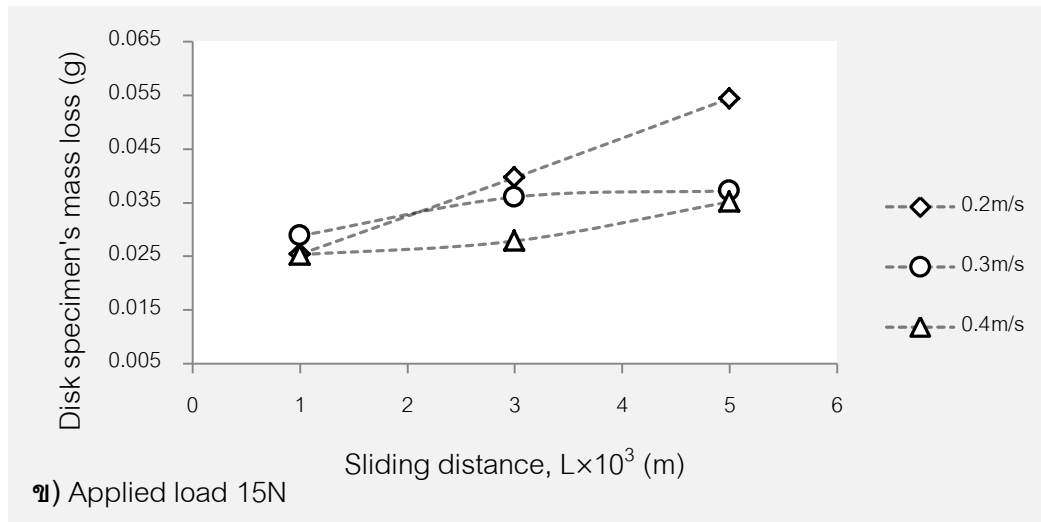
มวลที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอของทั้งสองชิ้นงาน (ฟินและดิสก์) นั้นสามารถตรวจสอบได้โดยการนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยมสี่ตำแหน่งทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ โดยที่ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปนี้คิดมาจากผลต่างของมวลของชิ้นงานที่ชั่งก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอกับมวลของชิ้นงานที่ชั่งหลังจากที่ทดสอบการสึกหรอแล้ว ในกรณีที่ค่าที่ได้เป็นบวกแสดงว่าชิ้นงานสูญเสียมวลหรือเนื้อวัสดุไปจากการขัดสีระหว่างคู่มือสัมผัสทั้งสองชิ้นงาน แต่ถ้าค่าที่ได้เป็นลบแสดงว่าชิ้นงานมีมวลหรือเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้น

ได้จากหลายสาเหตุอย่างเช่น เกิด transfer film คือมีการเคลื่อนย้ายมวลจากชิ้นงานหนึ่งไปติดบนผิวหน้าของอีกชิ้นงานหนึ่ง หรืออาจมาจากการเกิดปฏิกิริยาของผิวหน้าของชิ้นงานนั้นกับวัสดุอื่นในระบบเช่น ของเหลว, บรรยากาศ และผิวหน้าของอีกชิ้นงานหนึ่งแล้วทำให้มีเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้นก็ได้เช่นกัน

ได้ตรวจสอบค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานพินภายหลังจากทดสอบการสึกหรอแล้วนั้น แสดงไว้ในตารางที่ ผ.4 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง -0.0021 ถึง 0.0010 กรัม และในหลายๆสภาวะการทดสอบค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานพินมีค่าเปลี่ยนแปลงในทศนิยมอันดับที่ 4 ซึ่งเป็นทศนิยมอันดับสุดท้ายที่เครื่องชั่งสามารถตรวจวัดได้ และหลายๆครั้งที่ทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานแล้วพบว่าตัวเลขในทศนิยมอันดับที่ 4 นี้มีค่าไม่คงที่ ซึ่งค่าที่อ่านได้อาจจะมาจากมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานพินจริงๆหรืออาจได้รับผลกระทบมาจากปัจจัยอื่นๆอย่างเช่น สภาวะแวดล้อมขณะที่ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงาน หรือจะเป็นการสั่นสะเทือนของชิ้นงานและเครื่องชั่งน้ำหนักซึ่งส่งผลต่อค่ามวลของชิ้นงานที่เครื่องตรวจวัดได้และแสดงผลออกมา ทำให้ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่ตรวจวัดได้จากทศนิยมอันดับที่ 4 นี้ไม่น่าเชื่อถือและไม่สมควรที่จะนำมาพิจารณาว่าเป็นผลกระทบของตัวแปลที่ได้กำหนดให้ในการทดสอบการสึกหรอนี้

สำหรับมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานดิสก์ที่ได้จากสภาวะการทดสอบการสึกหรอที่กำหนดแสดงไว้ในตารางที่ ผ.5 ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานดิสก์มีค่าอยู่ในช่วง 0.0189 ถึง 0.0598 กรัม และในทุกสภาวะการทดสอบที่กำหนดค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าเป็นบวกหรืออาจเรียกว่าค่ามวลที่สูญเสียไป (mass loss) นั่นคือหลังจากที่ชิ้นงานดิสก์คือวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ขัดสีไบต์เพชรที่ติดอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานพินแล้ว เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไปจากชิ้นงานดิสก์ โดยที่แสดงมวลที่สูญเสียของชิ้นงานดิสก์สำหรับแต่ละสภาวะการทดสอบการสึกหรอที่กำหนดไว้ในรูปที่ 4.12 ก), ข) และ ค)





รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงค่ามวลที่สูญหายไปของชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไถลมากขึ้นเป็น 1000, 3000 และ 5000 เมตร ที่ความเร็วไถล 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร/วินาที และให้แรงกดที่ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน

พิจารณาที่ความเร็วไถลเชิงเส้นและแรงกดที่ให้คงที่ เมื่อระยะทางไถลเพิ่มขึ้นจาก 1000, 3000 และ 5000 เมตร พบว่าในทุกสภาวะการทดสอบมีค่ามวลที่สูญหายไปเพิ่มมากขึ้น จากการที่ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งคู่นั้นเกิดการขัดสีกันและเป็นผลให้เนื้อวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ของชิ้นงานดิสก์นั้นถูกกำจัดไปอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ระยะทางไถลน้อยๆไปจนถึงระยะทางมากที่สุดที่ได้ทำการทดสอบในงานนี้คือ 5000 เมตร

ถ้าพิจารณาที่แรงกดที่ให้ค่าหนึ่งอย่างเช่นในกรณี 20N และระยะทางไถลคงที่ เมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.2, 0.3 และ 0.4 m/s ส่งผลให้มวลที่สูญหายไปมีค่าลดลงในทุกๆระยะทางการไถล ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วไถลเชิงเส้นเพิ่มขึ้นในหัวข้อที่ 4.2.1 รูปที่ 4.11

4.2.3 อัตราการสึกหรอหรืออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ

จากหัวข้อที่ 4.2.2 สามารถตรวจวัดค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานดิสก์ได้แล้ว เมื่อเราทราบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานดิสก์ (ρ) ก็ทำให้สามารถคำนวณไปเป็นค่าปริมาตรการสึกหรอ (wear volume) ได้ดังสมการที่ 4.3 โดยที่ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่นำมาให้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 4.26 g/cm^3 [13]

$$V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (4.3)$$

โดยที่ V คือปริมาตรการสึกหรอ (mm^3)

Δm คือมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานดิสก์ (กรัม)

เมื่อได้ค่าปริมาตรการสึกหรอแล้วยังสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าของอัตราการสึกหรอจำเพาะ (specific wear rate) หรืออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (material removal rate) สามารถคำนวณได้จาก

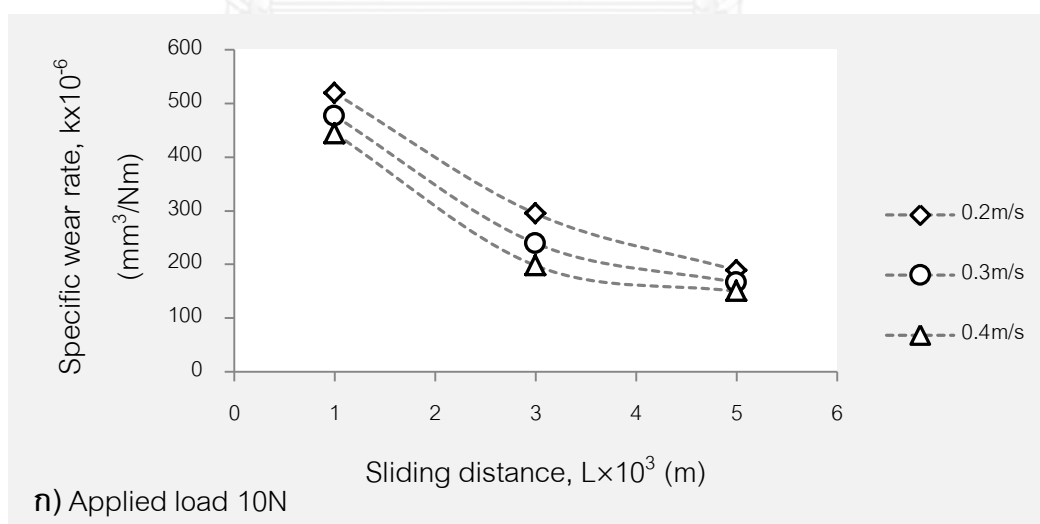
$$k = \frac{V}{(W \times L)} \quad (4.4)$$

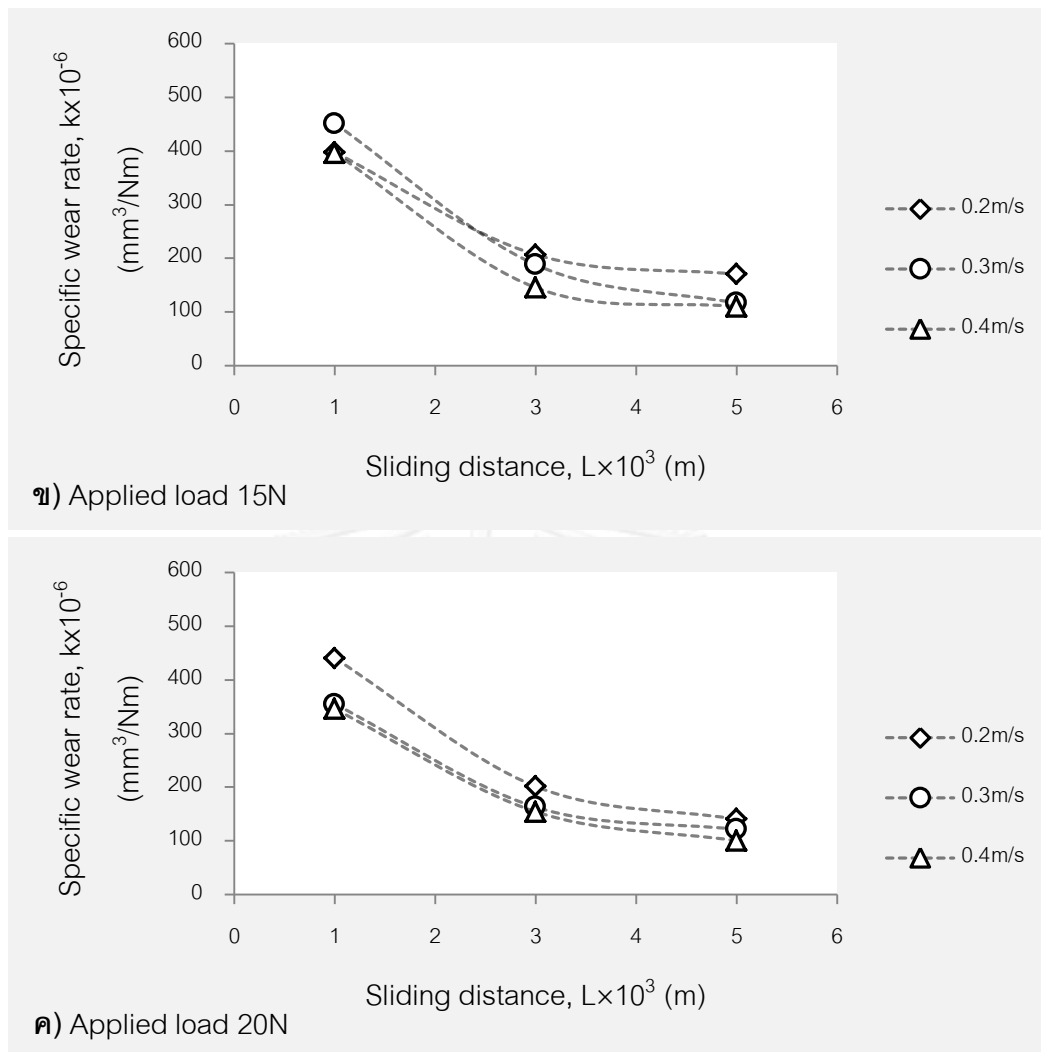
โดยที่ k คืออัตราการสึกหรอจำเพาะ ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)

W คือแรงกดที่ให้ (นิวตัน)

L คือระยะทางไถล (เมตร)

โดยที่ค่าของอัตราการสึกหรอจำเพาะที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.4 นั้นแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ ๕.5





รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไกลมากขึ้นเป็น 1000, 3000 และ 5000 เมตร ที่ความเร็วไกล 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร/วินาที และให้แรงกดที่ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน

จากรูปที่ 4.13 ก), ข) และ ค) พิจารณาที่ความเร็วไกลเชิงเส้นและแรงกดที่ให้เดียวกัน จะพบว่าอัตราการสึกหรอจำเพาะนั้นมีค่าลดลงเมื่อมีค่าระยะทางไกลที่เพิ่มขึ้นจาก 1000, 3000 และ 5000m ตามลำดับ ซึ่งการที่ระยะทางไกลเพิ่มมากขึ้นแล้วทำให้ค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะลดต่ำลง น่าจะเนื่องเมื่อระยะทางไกลเพิ่มมากขึ้นแล้วเม็ดเพชรที่อยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานพินถูกขัดสีไปทำให้ความคมของเม็ดเพชรลดลง และเป็นผลให้สามารถกำจัดเนื้อวัสดุอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้น้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาในแง่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความชันของเส้นแนวโน้มที่เชื่อมจุดของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอที่ระยะทางไกลเปลี่ยนแปลงไปจาก 1000 เมตรไปเป็น 3000 เมตร และจาก 3000 เมตร ไปเป็น 5000 เมตร โดยค่าความชันนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าความชันของเส้นแนว

โน้มน้ำที่เชื่อมจุดระยะทางไกล 1000 ไป 3000 เมตรแล้วพบว่าค่าความชันอยู่ในช่วง -95.2878 ถึง -131.5858 และเส้นแนวโน้มน้ำที่เชื่อมจุดระยะทางไกล 3000 ไป 5000 เมตร มีค่าความชันอยู่ในช่วง -17.6491 ถึง -52.7908 นั่นคืออัตราการลดลงของอัตราการสึกหรอจำเพาะของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมคาร์ไบด์นั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะไกลเพิ่มมากขึ้นสำหรับทุกความเร็วไกลเชิงเส้นและแรงกดที่ให้

ตารางที่ 4.3 ค่าความชันของเส้นเชื่อมจุดค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ จากแผนภูมิในรูปที่ 4.13

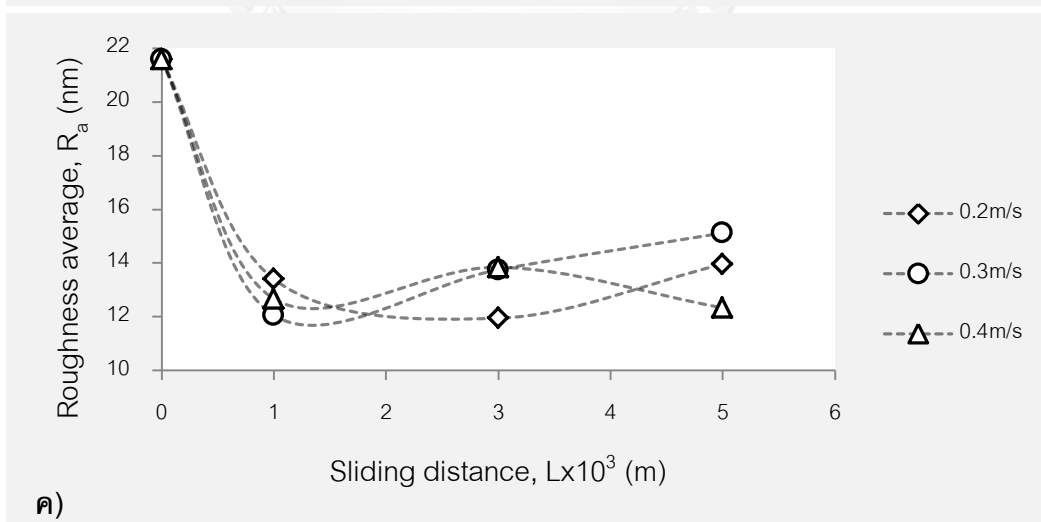
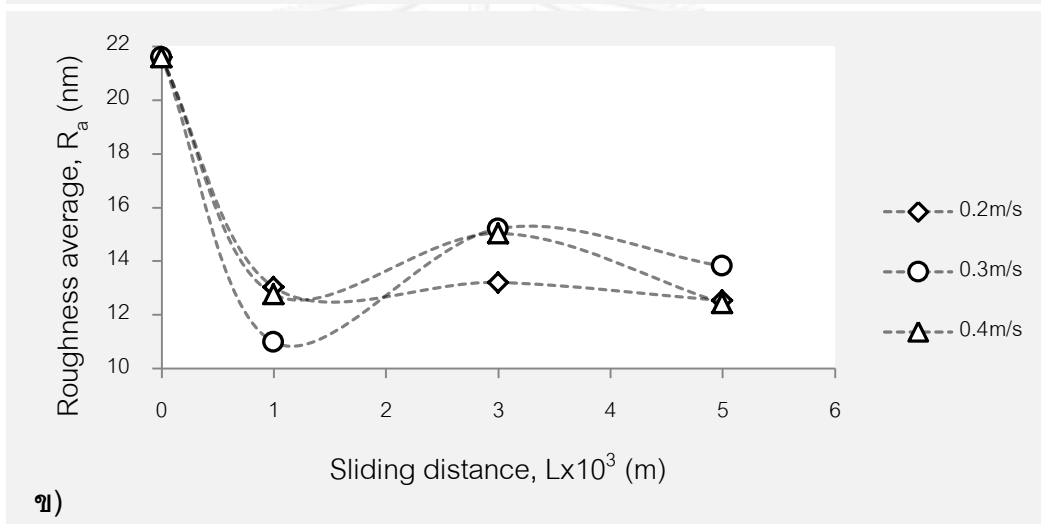
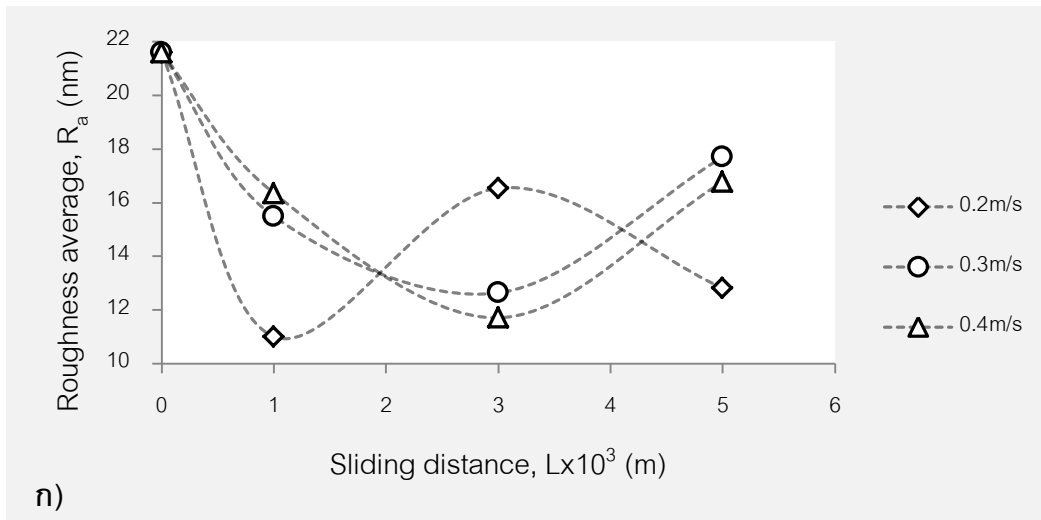
ความเร็วไกลเชิงเส้น (เมตร/วินาที)	แรงกดที่ให้ (นิตัน)	ช่วง 1000-300 เมตร	ช่วง 3000-500 เมตร
0.2	10	-112.1544	-52.7908
	15	-118.6750	-36.5676
	20	-122.9786	-23.9697
0.3	10	-95.2878	-18.2751
	15	-131.5858	-35.8112
	20	-125.2826	-17.6491
0.4	10	-119.3923	-30.5295
	15	-95.9833	-20.7616
	20	-95.5921	-26.9823

4.2.4 ความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบค่าความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานพินและชิ้นงานดิสก์ทั้งก่อนและหลังจากทดสอบการสึกหรอ แล้วนำมาหาค่าความหยาบผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากทดสอบการสึกหรอที่สภาวะต่างๆ ในส่วนของการวัดค่าความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังจากที่ได้ทดสอบการสึกหรอไปแล้ว ได้ทำการวัดจากบริเวณที่เกิดการสึกหรอขึ้นบนผิวหน้าชิ้นงาน 1) รอยการสึกหรอ (wear scar) อยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานพิน และ 2) ร่องการสึกหรอ (wear track) ที่อยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์ โดยค่าความความหยาบผิวที่ตรวจวัดจากบริเวณที่สึกหรอบนผิวหน้าของชิ้นงานสามารถถูกคำนวณและรายงานผลในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (average roughness, R_a), ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square roughness, R_q), ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

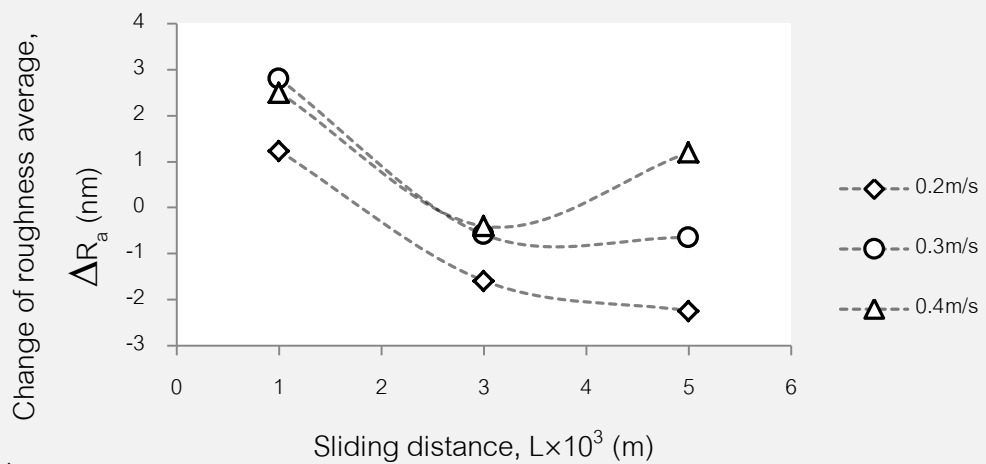
ลิบจุด (ten-point height roughness, R_z) โดยค่าความหยาบผิวทั้งสามชนิดแสดงในตารางที่ ผ.6 ถึง ผ.12

จากตารางที่ 4.2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวหน้าชิ้นงานพินก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 21.59nm ซึ่งหลังจากที่ได้นำชิ้นงานพินไปทดสอบการสึกหรอที่สภาวะทดสอบต่างๆที่กำหนดไว้แล้ว จึงตรวจสอบค่าความหยาบผิวของใบตัดเพชรบนชิ้นงานพินอีกครั้ง และพบว่าในทุกสภาวะทดสอบการสึกหรอที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงไปของความหยาบผิวของใบตัดเพชร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของใบตัดเมื่อทดสอบการสึกหรอไปแล้วแสดงอยู่ในรูปที่ 4.14 ก), ข) และ ค) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่าทุกสภาวะทดสอบการสึกหรอ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ นั่นคือเมื่อระยะทางไกลเพิ่มจาก 0 ไปถึง 1000 เมตร แล้วผิวหน้าของใบตัดมีความเรียบมากขึ้น อาจจะเป็นเนื่องมาจากเม็ดเพชรในบริเวณรอยการสึกหรอนั้นเกิดการขัดสีไปแล้วทำให้สูงขึ้น และในบางสภาวะการทดสอบสามารถตรวจพบการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเอง (self-dressing) ของผิวหน้าใบตัดเพชรได้จากลักษณะการแกว่งตัวขึ้นๆลงๆ (fluctuation) ของค่าความหยาบผิวและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อย่างเช่นในกรณีที่มีความเร็วไกลเชิงเส้นเท่ากับ 0.4 m/s และแรงกดที่ให้เป็น 10 นิวตัน ในรูปที่ 4.14 ก) จากที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีค่าลดลงไปเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นไปเป็น 1000 และ 3000 เมตร แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นเป็น 5000 เมตร และในรูปที่ 4.8 ก) สามารถพบลักษณะการแกว่งตัวขึ้นๆลงๆของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตลอดระยะทางไกลไปถึง 5000 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ Ching-Shan Lin และคณะ [14] โดยการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองของผิวหน้าใบตัดเพชรนั้นคือเมื่อเม็ดเพชรที่โผล่ขึ้นมาที่ผิวหน้าชั้นบนเกิดที่จากการขัดสี แล้วเกิดการแตกหักหรือหลุดออกของเม็ดเพชร ทำให้เนื้อพินนิเกิลสึกหรอไปเปิดผิวหน้าชั้นใหม่และเม็ดเพชรที่มีความคมในชั้นถัดไปโผล่ขึ้นมาได้ ส่วนความรุนแรงของการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองนั้นจะขึ้นกับแรงกดที่ใช้ในการขัดสี โดยเมื่อให้แรงกดสูงขึ้นแล้วความรุนแรงของการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองจะลดลง โดยดูได้จากกรณีของความเร็วไกลเชิงเส้นที่ 0.4 เมตรต่อวินาทีเท่ากับที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ และใช้แรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 20 นิวตัน ซึ่งลักษณะของกราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรูปที่ 4.8 ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ตลอดระยะทางไกลไปถึง 5000 เมตร และมีการแกว่งตัวขึ้นๆลงๆช่วงแคบกว่าในกรณีที่ให้แรงกด 10 นิวตัน ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่เม็ดเพชรบนผิวหน้าใบตัดเกิดที่แต่การให้แรงกดที่สูงทำให้เม็ดเพชรหลุดออกไปจากผิวหน้าใบตัดได้ยากกว่ากรณีที่ให้แรงกดต่ำ และความรุนแรงของการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองยังสามารถพิจารณาได้จากความชันของเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.14 ก), ข) และ ค) สามารถสังเกตเห็นว่าเมื่อแรงกดที่ให้มีความเพิ่มมากขึ้นจาก 10, 15 และ 20 นิวตัน แล้วความชันของเส้นแนวโน้มมีค่าลดลง และมีทิศทางเดียวกันกับความรุนแรงของการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองที่ลดลง

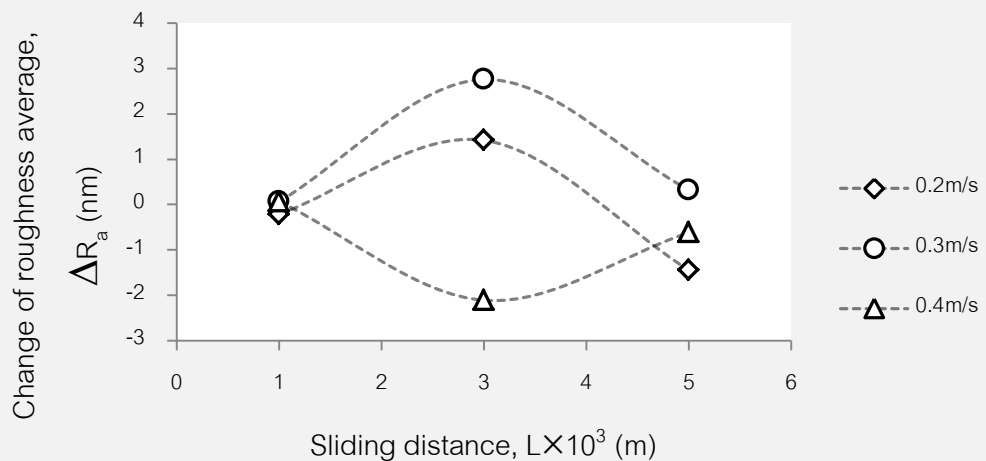


รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวบริเวณรอยการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงานพินเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นจนถึง 5000 เมตร ของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ โดยที่แรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน

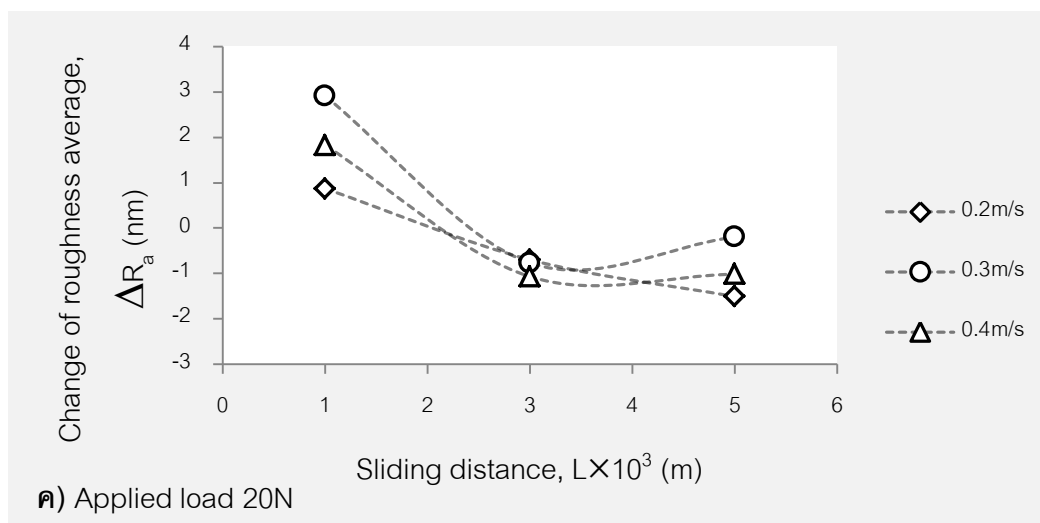
ในส่วนของชิ้นงานดิสก์ได้ตรวจวัดค่าความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับค่าความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์แต่ละชิ้นก่อนทำการทดสอบการสึกหรอ จากตารางที่ ผ.6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานดิสก์มีค่าอยู่ในช่วง 17.90 ถึง 21.35 nm ซึ่งแผ่นที่มีค่าน้อยที่สุดและแผ่นที่มีค่ามากที่สุดมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันถึง 3.45 nm จึงคิดค่าความหยาบผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทดสอบการสึกหรอที่สภาวะต่างๆจากค่าความหยาบผิวหน้าในสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ โดยแสดงในตารางที่ ผ.10, ผ.11 และ ผ.12 และการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.15 ก), ข) และ ค)



ก) Applied load 10N



ข) Applied load 15N



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดิสก์เมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นจนถึง 5000 เมตร ของแต่ละสภาวะทดสอบการสึกหรอ โดยที่แรงกดที่ให้เท่ากับ ก) 10 นิวตัน, ข) 15 นิวตัน และ ค) 20 นิวตัน

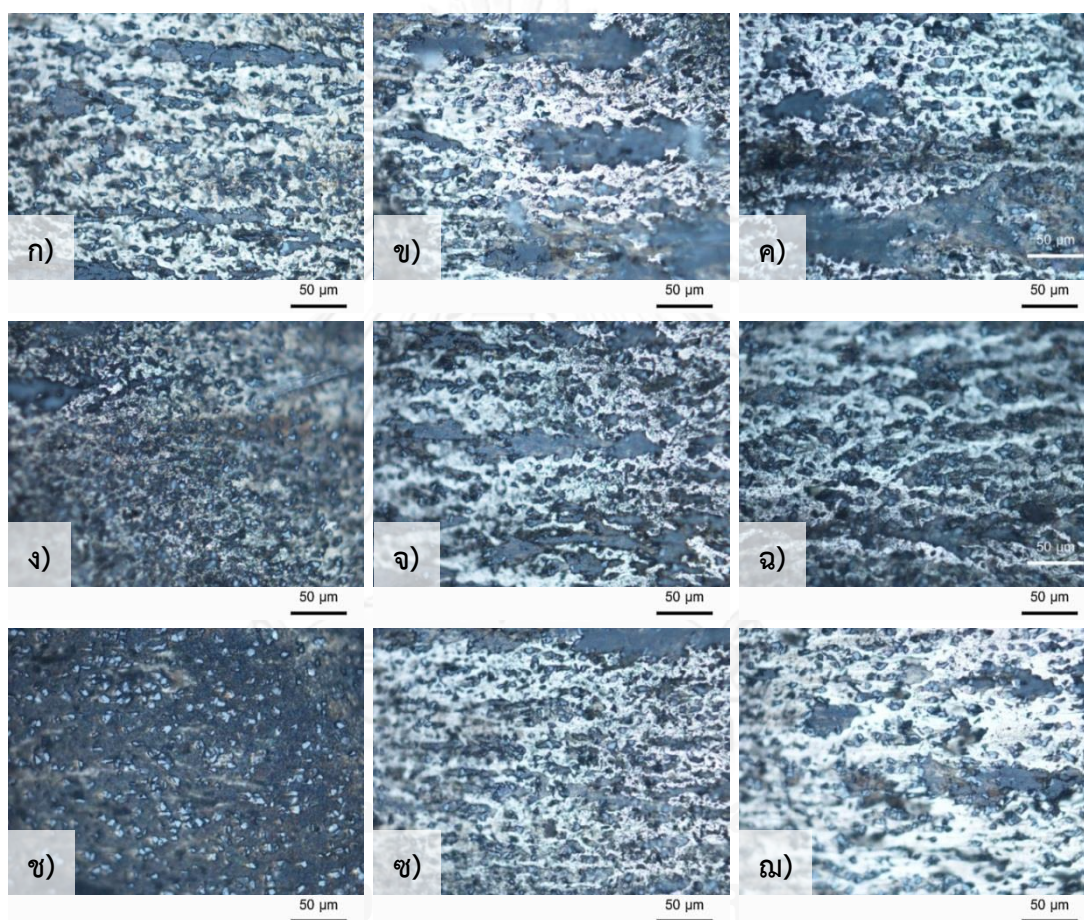
จากรูปที่ 4.15 ก), ข) และ ค) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปของร่องการสึกหรอบนชิ้นงานดิสก์นั้นจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงไปของค่าความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานพินจากรูปที่ 4.14 ก), ข) และ ค) ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ให้แรงกระทำ 10 นิวตัน ในช่วงระยะทางไกลน้อยกว่า 1000 เมตร เม็ดเพชรมีความคมอยู่ (ความหยาบผิวหน้าสูง) เมื่อขัดสีกับผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์จึงทำให้ความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์เพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าที่เป็นบวกซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ก) และเมื่อระยะทางไกลเพิ่มมากขึ้นเม็ดเพชรเกิดการสึกหรอไป ความรุนแรงของการขัดสีจึงลดต่ำลงดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.13 ก) คือค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะมีค่าลดน้อยลง และเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นไปเป็น 5000 เมตรในกรณีของความเร็วไกล 0.4 m/s ความหยาบผิวหน้าของชิ้นงานพินมีค่าสูงขึ้นจากการผลิตผิวใหม่ จึงเป็นผลให้ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์ที่ขัดสีด้วยก็มีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

4.2.5 โครงสร้างจุลภาคและลักษณะทางสัณฐานของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอ

ผิวหน้าของชิ้นงานหลังจากที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอมาแล้วนั้นได้ถูกนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างจุลภาคและลักษณะทางสัณฐาน เพื่อที่จะได้เห็นสภาพทางจุลภาคของผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังจากที่ผ่านการขัดสีกันขึ้นระหว่างผิวคู่สัมผัส และอาจจะสามารถบอกได้ถึงสิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ผิวคู่สัมผัสนั้นเกิดการขัดสีกันอีกด้วย

4.2.5.1 ผิวหน้าของไบต์ดเพชร

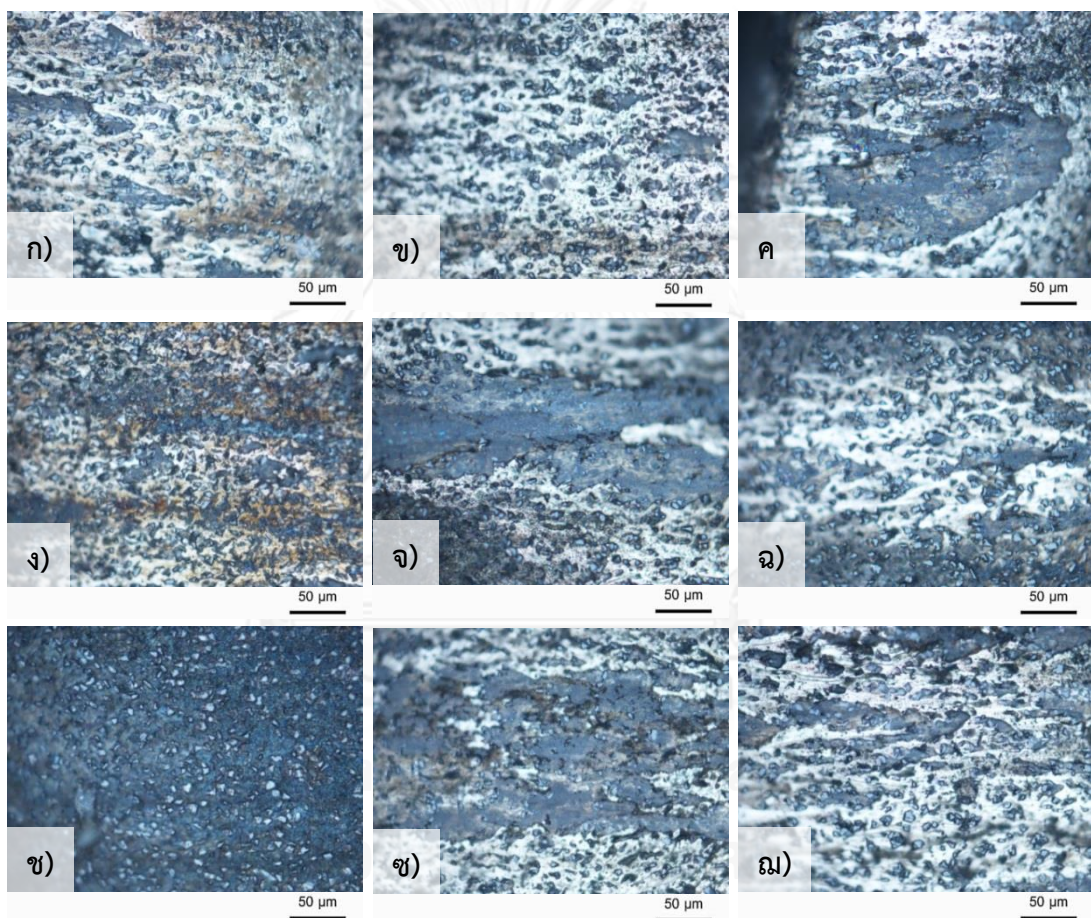
จากรูปที่ 4.1 ได้ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของผิวหน้าไบต์ดเพชรในสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ ไปแล้ว และในหัวข้อนี้จึงได้ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของผิวหน้าไบต์ดเพชรที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะหลังจากทดสอบการสึกหรอตามสภาวะการทดสอบที่กำหนดเรียบร้อยแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง รูปภาพลักษณะทางสัณฐานของไบต์ดเพชรที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงไว้ในรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.16 ภาพผิวหน้าของไบต์ดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฅ) 20 นิวตัน 5000 เมตร

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปจากการขัดสีกันระหว่างผิวหน้าไบต์ดเพชรกับผิวหน้าวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที พิจารณาโดยมีแรงกดที่ให้ค่าหนึ่งอย่างเช่นในกรณี 10 นิวตัน ในรูป ก), ข) และ ค) ระยะทางไกลเพิ่มขึ้นจาก 1000, 3000 ไปจนถึง 5000 เมตร ตามลำดับ สามารถสังเกตเห็นได้ว่าที่ผิวหน้าของ

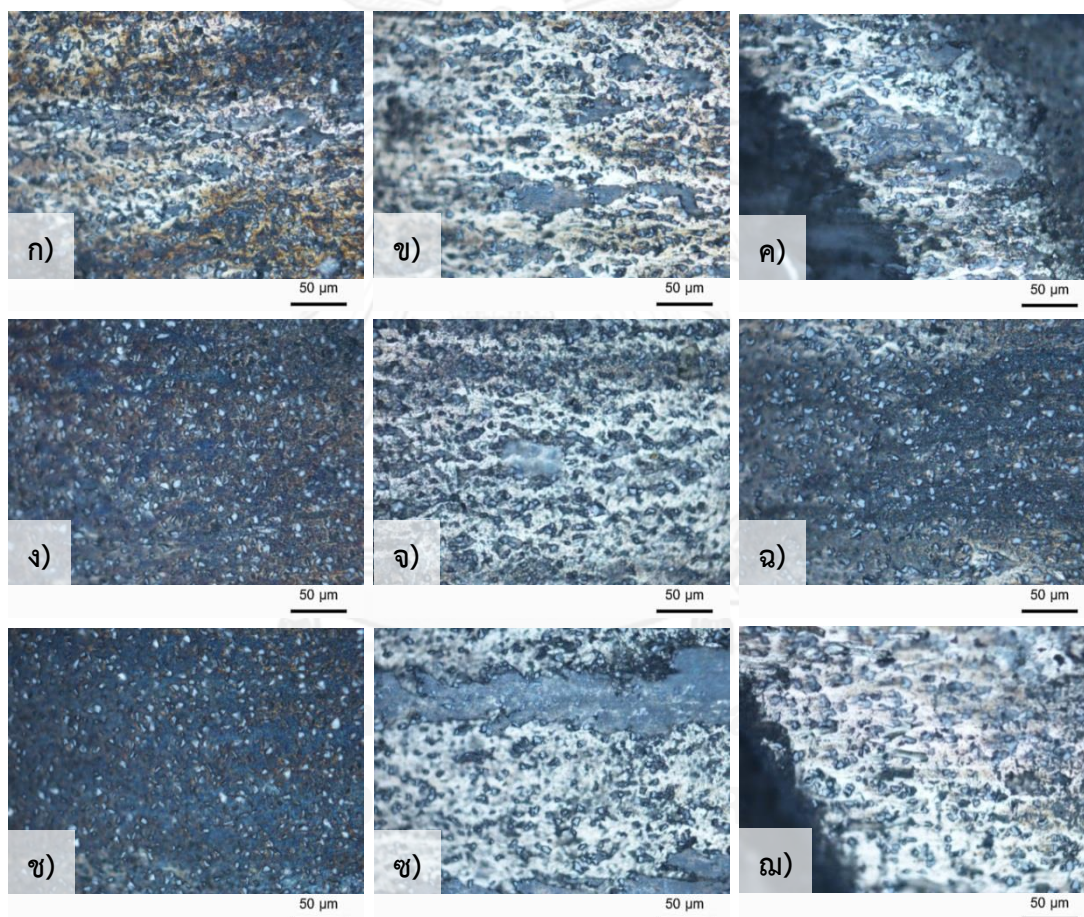
ใบตัดเพชรนั้นมีเนื้อวัสดุสีเทาที่มีลักษณะเป็นแถบมาติดอยู่เป็น transfer film ซึ่งน่าจะเป็นเนื้อของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่หลุดมาจากชิ้นงานดิสก์ในระหว่างการขัดสี โดยแถบ transfer film นี้มีขนาดกว้างขึ้นเมื่อระยะทางไกลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่แรงกดที่ให้เปลี่ยนแปลงไปโดยในรูป ค), ฉ) และ ฉ) ใช้แรงกดเป็น 10, 15 และ 20 นิวตัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแถบ transfer film มีปริมาณน้อยลงและความกว้างน้อยลงด้วยตามการเพิ่มขึ้นของแรงกดที่ให้ ในรูป 4.16 ข) เห็นได้ว่าผิวหน้าของใบตัดเมื่อผ่านระยะทางไกลไปแล้ว 1000 เมตรแต่ยังคงมีลักษณะทางสัญญาณที่ใกล้เคียงกับผิวหน้าของใบตัดก่อนทดสอบการสึกหรอในรูปที่ 4.1 ข)



รูปที่ 4.17 ภาพผิวหน้าของใบตัดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 20 นิวตัน 5000 เมตร

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากการขัดสีกันระหว่างผิวหน้าใบตัดเพชรกับผิวหน้าวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีที่ให้แรงกด 10 นิวตัน แล้วลักษณะผิวหน้าของใบตัดที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นเป็นแบบ

เดียวกันกับกรณีที่ใช้ความเร็วไถลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที นั่นคือ เมื่อระยะทางไถลเพิ่มขึ้นแล้วแถบ transfer film มีขนาดกว้างขึ้น แต่สำหรับกรณีที่ใช้แรงกด 15 และ 20 นิวตันนั้นมีพฤติกรรมของแถบ transfer film ที่ได้แตกต่างกันออกไป นั่นคือที่ระยะทางไถล 3000 เมตรในรูป จ) และ ช) แสดงให้เห็นถึงแถบ transfer film ที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อระยะทางไถลเพิ่มขึ้นไปถึง 5000 เมตรในรูป ฉ) และ ซ) แถบ transfer film ที่ปรากฏอยู่มีขนาดเล็กลงจากที่ระยะทางไถล 3000 เมตรมาก ซึ่งเกิดจากการหลุดออก (peel off) ของ transfer film จากผิวหน้าใบตัดเพชรน่าจะเป็นเนื่องจากแรงยึดติดระหว่างผิวหน้าของใบตัดเพชรกับแถบ transfer film นั้นไม่มากพอที่จะทนต่อแรงเสียดทานจากการขัดสีในระยะทางไถลที่เพิ่มมากขึ้นได้ จึงเกิดการหลุดออกในที่สุด



รูปที่ 4.18 ภาพผิวหน้าของใบตัดเพชรหลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไถลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไถลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 20 นิวตัน 5000 เมตร

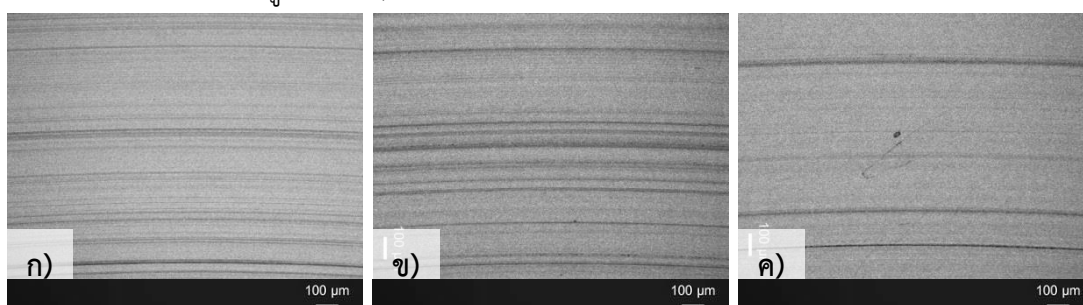
จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากการขัดสีกันระหว่างผิวหน้าใบตัดเพชรกับผิวหน้าวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วไถลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อ

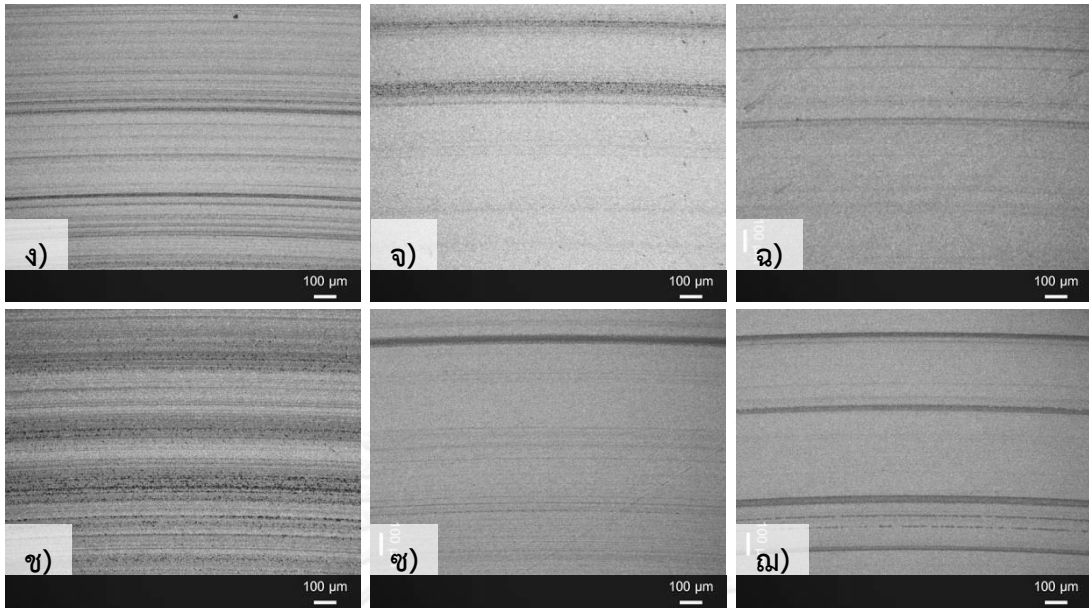
วินาที ในกรณีแรงกดที่ให้ 10 นิวตันมีลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในกรณีของความเร็วไหลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน ในรูปที่ 4.17 และในกรณีที่ให้แรงกด 15 และ 20 นิวตัน นั้นก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในกรณีของความเร็วไหลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 และ 20 นิวตัน ในรูปที่ 4.17

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของผิวหน้าใบตัดเพชรที่เปลี่ยนแปลงไปหลังทดสอบการสึกหรอพบว่า มี 2 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นแตกต่างกันและเป็นผลมาจากแรงกดที่ให้มีความแตกต่างกันนั้นคือ 1) การที่ของเม็ดเพชร และ 2) ขนาดความกว้างของแถบ transfer film โดยกรณีที่ให้แรงกดต่ำ (10 นิวตัน) การที่ของเม็ดเพชรจะเกิดขึ้นช้า คือมีระยะทางไกลมากๆแล้ว อย่างเช่นในรูปที่ 4.18 ค) ที่ระยะทางไกลผ่านไปแล้ว 5000 เมตรสามารถสังเกตเม็ดเพชรที่ที่นั่นคือผิวหน้าของเม็ดเพชรเรียบไปกับเนื้อพื้นนิกเกิลได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.18 ก) และ ข) ที่ระยะทางไกลผ่านไป 1000 และ 3000 เมตรตามลำดับ และยังพบว่า มีแถบ transfer film อยู่บางๆบนผิวหน้าใบตัดเพชร อย่างในรูป 4.17 ข) และ 4.18 ข) ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันกับในกรณีที่ให้แรงกดสูง (20 นิวตัน) ที่พบว่าเม็ดเพชรจะที่อย่างรวดเร็ว จะเห็นได้จากในรูปที่ 4.16 ข) และ 4.18 ข) คือสามารถสังเกตเห็นเม็ดเพชรที่เรียบไปกับเนื้อพื้นนิกเกิลได้ตั้งแต่วะยะทางไกล 1000 เมตร และพบว่าแถบ transfer film มีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างในรูปที่ 4.17 ข) และ 4.18 ข) ซึ่งการที่มี transfer film ขนาดใหญ่อยู่บนผิวหน้าของใบตัดเพชร ทำให้คู่ผิวสัมผัสของการขัดสีที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งการที่คู่ผิวสัมผัสเป็นวัสดุที่มีความแข็งลดลงแล้วเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20 นิวตัน ในกราฟรูปที่ 4.10

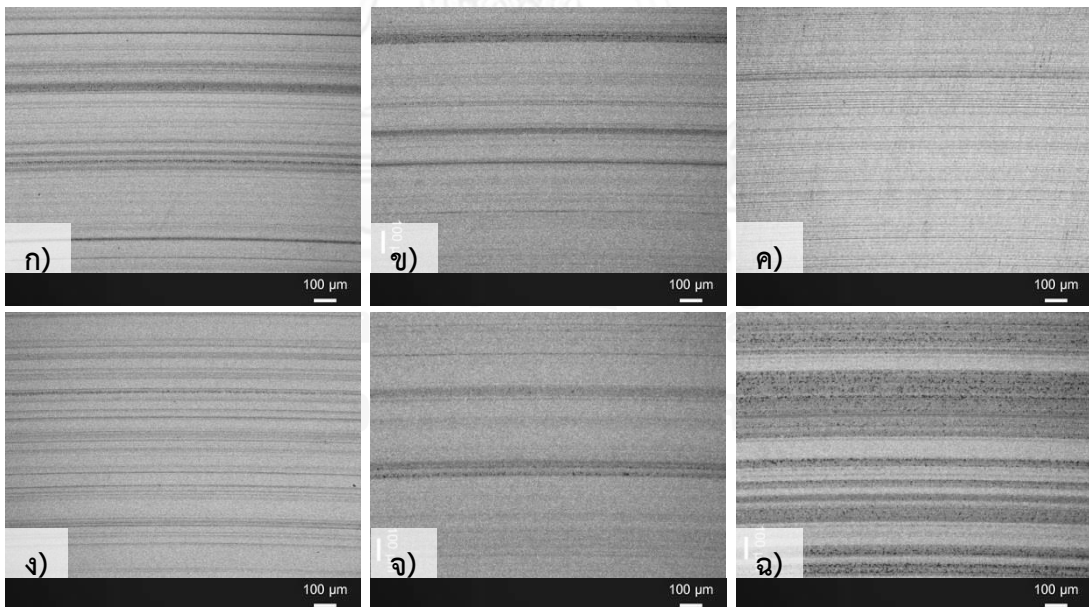
4.2.5.2 ผิวหน้าของแผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

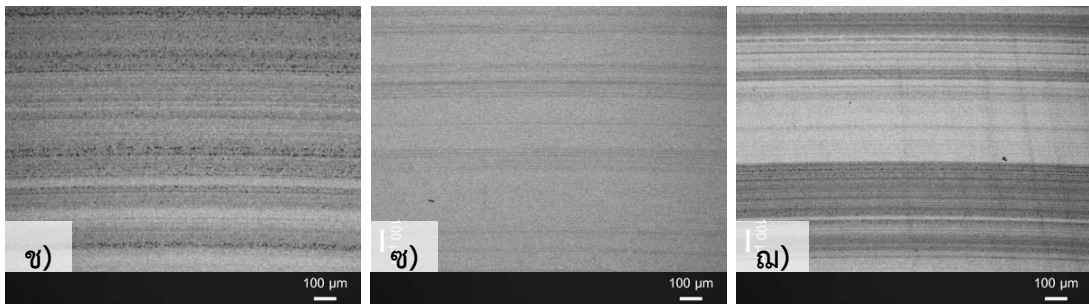
ในส่วนของผิวหน้าของแผ่นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์นั้นได้ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอที่สภาวะทดสอบต่างๆแล้ว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยได้ทำการตรวจสอบผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปเฉพาะในส่วนของการสึกหรอที่เกิดขึ้น และจึงแสดงในรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21



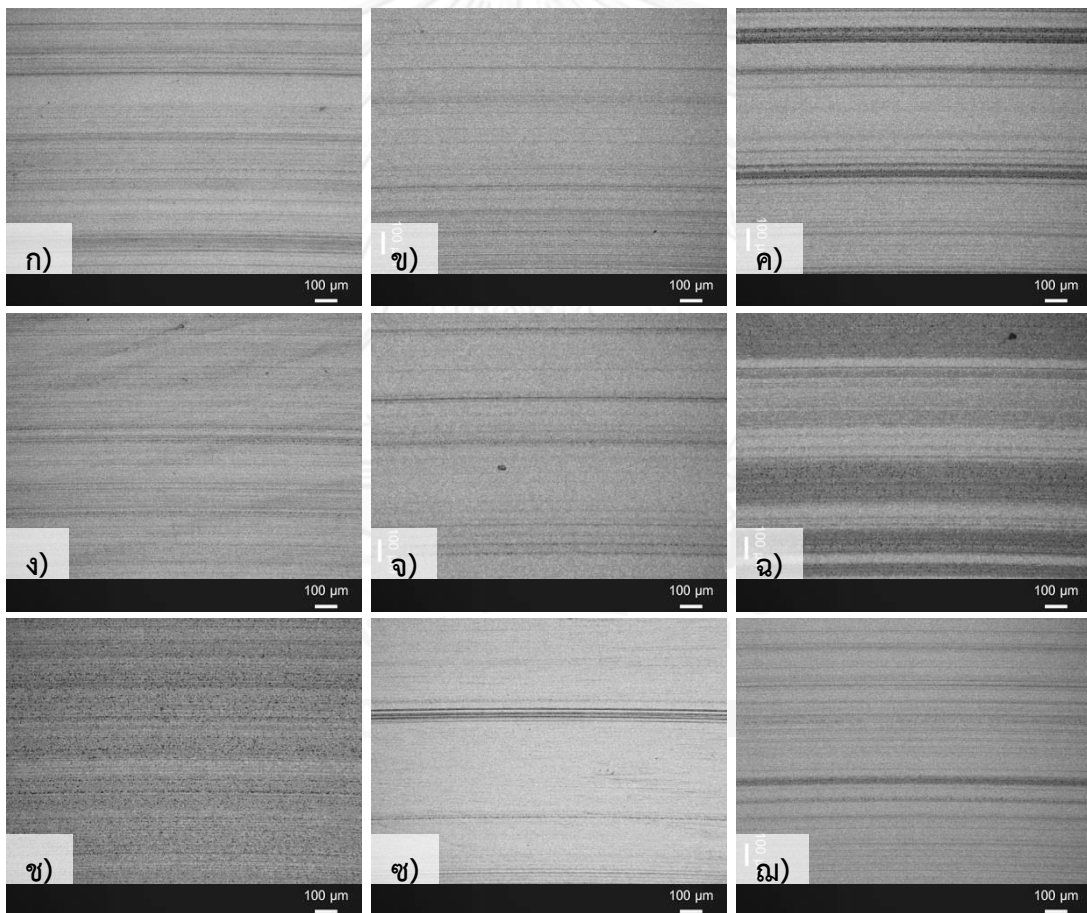


รูปที่ 4.19 ภาพผิวหน้าของร่องการสึกหรอบนชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ฌ) 20 นิวตัน 5000 เมตร





รูปที่ 4.20 ภาพผิวหน้าของร่องการสีกหรือบนชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ณ) 20 นิวตัน 5000 เมตร



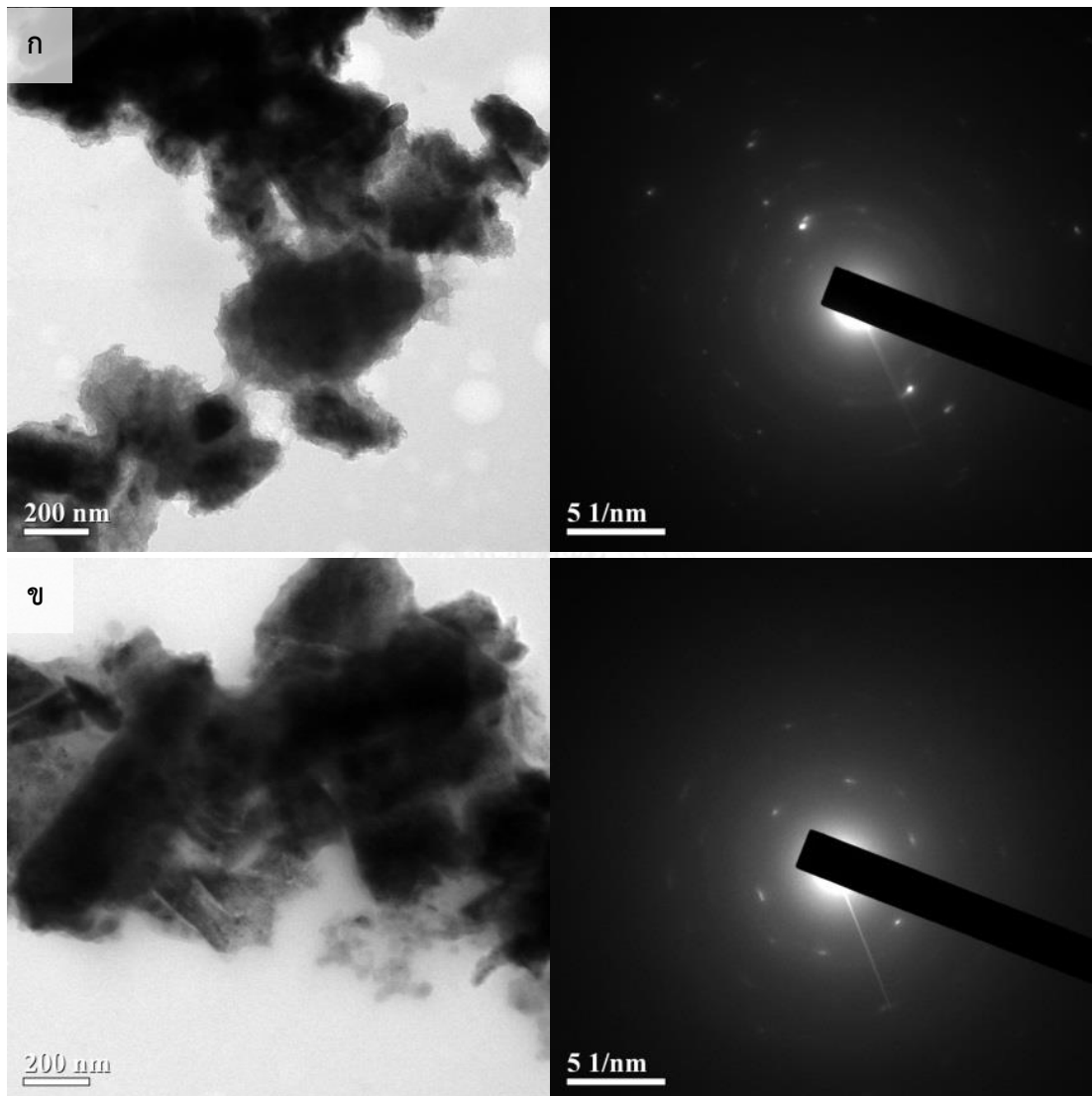
รูปที่ 4.21 ภาพผิวหน้าของร่องการสีกหรือบนชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้และระยะทางไกลเป็น ก) 10 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 10 นิวตัน 3000 เมตร, ค) 10 นิวตัน 5000 เมตร, ง) 15 นิวตัน 1000 เมตร, จ) 15 นิวตัน 3000 เมตร, ฉ) 15 นิวตัน 5000 เมตร, ช) 20 นิวตัน 1000 เมตร, ซ) 20 นิวตัน 3000 เมตร, ณ) 20 นิวตัน 5000 เมตร

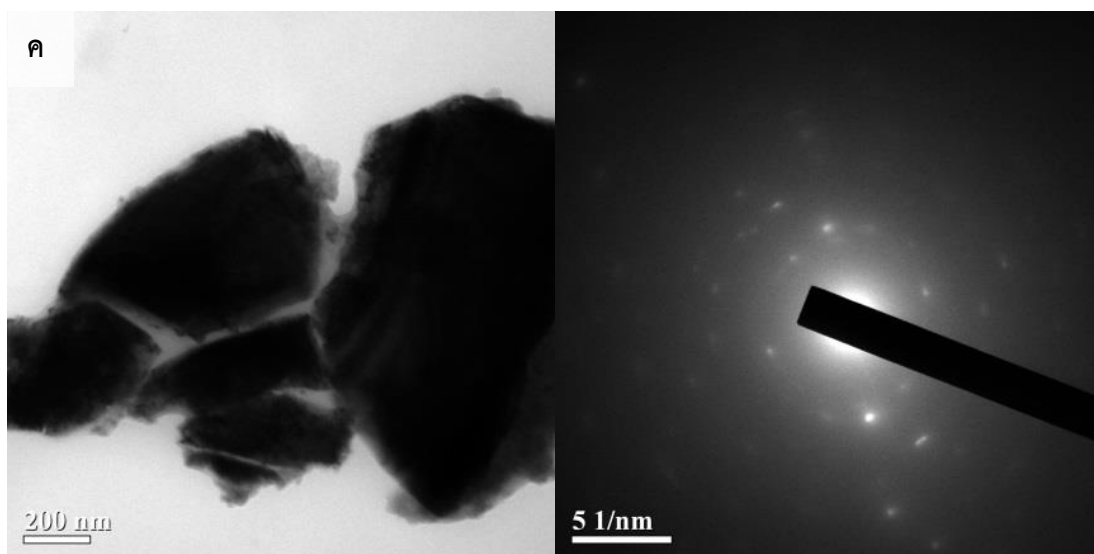
จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.12 เป็นภาพแสดงลักษณะทางสัญญาณที่เกิดขึ้นหลังจากที่เกิดการขัดสีระหว่างผิวหน้าของใบตัดเพชรและผิวหน้าของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยพบว่าลักษณะทางสัญญาณของผิวหน้าของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดระยะทางไกลที่ทดสอบ และในบางสภาวะทดสอบการสึกหรอยังสามารถตรวจพบร่องรอยการหลุดของเกรน (grain pull out) จากผิวหน้าของวัสดุได้อย่างชัดเจนอย่างในกรณีที่ให้แรงกดที่สูงและระยะทางไกลผ่านไปน้อยๆเช่น ในกรณีที่ระยะทางไกล 1000 เมตร แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูป 4.19 ข), 4.20 ข) และ 4.21 ข) ตามลำดับ ซึ่งการเกิดการหลุดของเกรนที่พบนี้เป็นพฤติกรรมปกติที่สามารถเกิดขึ้นได้กับการสึกหรอแบบ abrasive ของวัสดุเปราะ [15] เมื่อเกิดลักษณะการหลุดของเกรนนี้แล้วจะส่งผลให้อัตรการสึกหรอของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่าสูงอยู่ในช่วง 345×10^{-6} ถึง 440×10^{-6} mm^3/Nm ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ค) และยังทำให้ความหยาบผิวของร่องการสึกหรอมีค่าสูงอีกด้วย ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ค) ที่ระยะทางไกล 1000 เมตรค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าเป็นบวกและมีค่าเพิ่มขึ้น 0.87 ถึง 2.91 nm เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ จากนั้นเมื่อระยะทางไกลเพิ่มขึ้นเป็น 3000 และ 5000 เมตรแล้วไม่สังเกตเห็นร่องรอยการหลุดของเกรนเกิดขึ้นบนผิวหน้าของร่องการสึกหรอได้อย่างชัดเจน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่เม็ดเพชรถูกขัดสีจนที่ออกไปแล้วตั้งแต่ช่วงระยะทางไกลต่ำตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.5.1 มีความรุนแรงของพฤติกรรมการเปิดคมผิวใบตัดด้วยตัวเองที่น้อยตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4 จึงทำให้ความรุนแรงของการขัดสีลดลงจากช่วงระยะทางไกล 1000 เมตร ดังจะเห็นได้จากอัตรการสึกหรอจำเพาะที่ลดลงอยู่ในช่วง 154×10^{-6} ถึง 201×10^{-6} mm^3/Nm และ 100×10^{-6} ถึง 140×10^{-6} mm^3/Nm ของระยะทางไกล 3000 และ 5000 เมตรตามลำดับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ค) และเป็นผลให้ผิวหน้าของร่องการสึกหรอที่ได้เรียบมากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ ดังจะเห็นได้จากค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของร่องการสึกหรอที่เป็นค่าลบ อยู่ในช่วง -0.69 ถึง -1.07 nm และ -0.19 ถึง -1.51 nm ของระยะทางไกล 3000 และ 5000 เมตรตามลำดับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ค)

4.2.6 ผลกระทบที่มีต่อเศษวัสดุที่หลุดร่อนจากการสึกหรอ

ในระหว่างที่ทำการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานทั้งสองนั้นจะเกิดเป็นผิวหน้าสัมผัส (contacting surface) ระหว่างผิวหน้าของดิสก์ซึ่งเป็นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งสัมผัสอยู่กับผิวหน้าของชิ้นงานพินซึ่งประกอบด้วยเฟสของเพชรและเฟสเนื้อพื้นโลหะผสมนิกเกิล และขณะที่เกิดการไถลระหว่างผิวหน้าสัมผัสจะมีเศษวัสดุที่หลุดร่อน (wear debris) จากผิวหน้าสัมผัสนี้ขึ้น โดยอาจจะมาจากชิ้นงานใดชิ้นงานหนึ่งหรืออาจมาจากทั้งสองชิ้นเลยก็ได้ จึงต้องทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเศษวัสดุที่หลุดร่อนนี้ว่าเป็นวัสดุชนิดใดและมีสมบัติเป็นอย่างไร เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากที่ผ่านการขัดสีของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะการทดสอบการสึกหรอนั้นๆหรือไม่ จึงนำเศษวัสดุที่หลุดร่อน

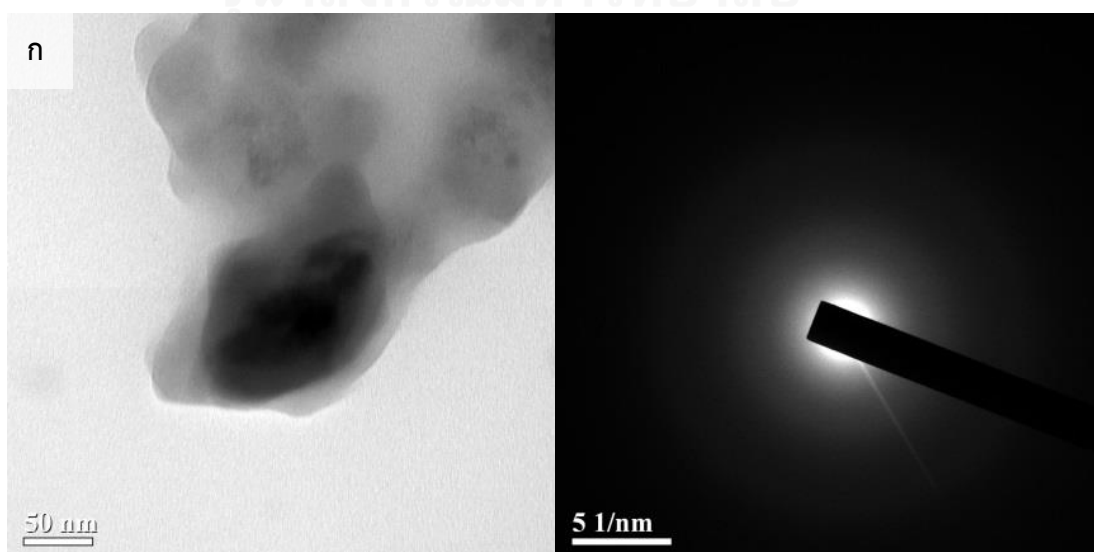
จากชิ้นงานทดสอบในแต่ละสภาวะการทดสอบไปตรวจสอบลักษณะของอนุภาคคือรูปร่างและขนาดของอนุภาค และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction) ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซมิคอนดักเตอร์จากการสีกหรือ ซึ่งได้ผลดังนี้

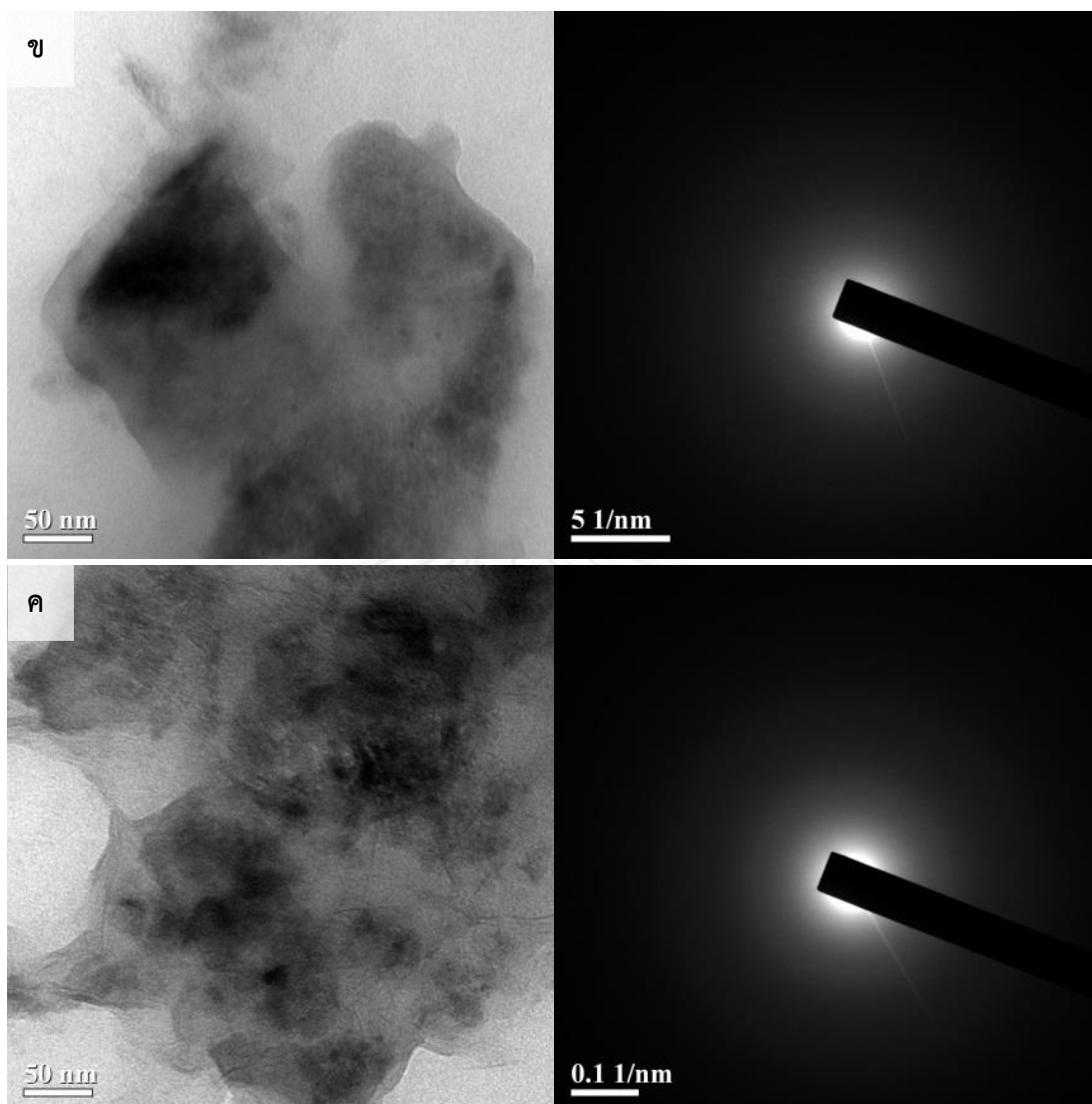




รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเส้นใยคาร์บอนจากการทดสอบการสีกหรือที่ความเร็วไกลเชิงเส้น, แรงกดที่ให้ และระยะทางไกล ก) 0.4 เมตรต่อวินาที 20 นิวตัน 1000 เมตร, ข) 0.4 เมตรต่อวินาที 20 นิวตัน 3000 เมตร และ ค) 0.4 เมตรต่อวินาที 15 นิวตัน 5000 เมตร

ในบางสภาวะทดสอบการสีกหรือได้ตรวจพบว่าเส้นใยคาร์บอนที่หลุดร่อนจากการขัดสีมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวซึ่งสามารถดูได้จากภาพ electron diffraction pattern ในรูปที่ 4.22 ก), ข) และ ค) ซึ่งมีลักษณะเป็นจุดๆ ซึ่งน่าจะเป็นวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เกิดการหลุดของเกรนที่ได้ อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.5.2 และในบางสภาวะทดสอบการสีกหรือได้ตรวจพบว่าเส้นใยคาร์บอนที่หลุดร่อนจากการขัดสีมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งสามารถดูได้จากภาพ electron diffraction pattern ในรูปที่ 4.23 ก), ข) และ ค) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงฟุ้งๆ





รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไถเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไถ ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการสึกหรอของคูผิวสัมผัสระหว่างวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับใบตัดเพชรที่มีโลหะนิกเกิลเป็นตัวประสาน โดยใช้เทคนิคพินออนดิสก์เป็นเครื่องมือในการศึกษา ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับใบตัดเพชรสามารถพิจารณาได้จากเอกลักษณ์ในเทอมของ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, อัตราการสึกหรอจำเพาะ, ความหยาบผิวหน้าเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคและสัญญาณ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อเอกลักษณ์เทอมต่างๆได้แก่

1) การหล่อลื่นที่ดีขึ้นของชั้นฟิล์มหล่อลื่นจากการที่ความเร็วไถเชิงเส้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงในค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอจำเพาะของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ลดต่ำลง

2) ความคมของเม็ดเพชรบนผิวหน้าใบตัดที่ลดลงจากระยะทางไถและแรงกดที่ให้เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงในค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ลดต่ำลง

2) ความหนาของแถบ transfer film ที่มากขึ้นจากการที่ให้แรงกดเพิ่มสูงขึ้นจาก 15 เป็น 20 นิวตัน ซึ่งแสดงในค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เพิ่มสูงขึ้น

3) การเกิดการสึกหรอแบบ abrasive ในโหมด grain pull-out กรณีที่ให้แรงกดสูง ในช่วงระยะทางไถต่ำ ซึ่งแสดงในรูปโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าร่องการสึกหรอ, ค่าความหยาบผิวของร่องการสึกหรอสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนทดสอบการสึกหรอ และอัตราการสึกหรอจำเพาะของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สูง

4) ความรุนแรงของพฤติกรรมการผลัดผิวใหม่ด้วยตัวเองของใบตัดเพชรลดลงเมื่อแรงกดที่ให้มีความสูงขึ้น และสามารถตรวจสอบได้จากการแกว่งตัวขึ้นๆลงๆของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ลดน้อยลง และความชันของการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของใบตัดเพชรที่ลดลง

5.1.2 เศษวัสดุที่หลุดร่อนจากการทดสอบการสึกหรอนี้ พบว่ามีทั้งลักษณะที่เป็นผลึกเดี่ยวและอสัญฐาน โดยสามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค electron diffraction pattern จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรปรับปรุงเครื่องมือทดสอบการสีกหรือให้มีระบบจ่าย ไหลเวียน และกรอง สารหล่อเย็น ด้วย เพื่อที่จะด้สามารถควบคุมความสะอาดของสารหล่อเย็นให้คงที่ตลอดการทดสอบการสีกหรือ เนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและการพาเสยวัสดุที่หลุดร้อนจากการสีกหรือ ออกจากคูผิวสัมผัส และยังเพื่อที่จะได้มีระบบในการเก็บตัวอย่างเสยวัสดุที่หลุดร้อนจากการสีกหรือที่ดีขึ้น

5.2.2 ควรปรับปรุงวิธีการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานทั้งใบตัดเพชรและวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ให้ดีกว่านี้ ซึ่งน่าจะสามารลดการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้ให้น้อยลง

5.2.3 ควรเพิ่มกำลังขยายของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคให้สูงกว่านี้ เพื่อที่จะได้สามารถมองเห็นร่องรอยจากการขัดสีได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.2.4 ควรทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้ง โดยเลือกความเร็วไหลเชิงเส้นและน้ำหนักกดค่าเดียว แต่ทำการศึกษาที่ระยะทางไหลที่ละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ได้เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนขึ้น และอาจใช้เพชรเม็ดเดียวในการศึกษาเป็นพิน เพื่อลดความสุมจากการสีกหรือเนื่องจากจำนวนเม็ดเพชรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและมีความแตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

1. Bhushan, B., *Nanotribology and nanomechanics II*. 3rd ed. 2011: Springer.
2. *2008 Annual Book of ASTM Standards*. 2008. p. 408-412.
3. C. Ferrer, M.P., D. Busquets, E. Rayón, *Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique*. *Wear*, 2010. **268**: p. 784–789.
4. Yet-Ming Chiang, D.P.B.I., W.D. Kingery, *Physical Ceramics : Principles for Ceramics Science and Engineering*. 1997: John Wiley & Sons.
5. *Technical Ceramics: Aluminium Oxide Ceramics / Alumina Ceramics / Al₂O₃*. [cited 2014 22/04]; Available from: <http://www.matbase.com/material-categories/ceramics-and-glasses/crystalline/technical/aluminium-oxides/>.
6. C.B. Carter, M.G.N., *Ceramic Materials : Science and Engineering*. 2007: Springer.
7. *Titanium Carbide / TiC*. [cited 2014 22/04]; Available from: <http://www.matbase.com/material-categories/ceramics-and-glasses/crystalline/technical/carbides/material-properties-of-titanium-carbide-tic.html>.
8. F.L. Matthews, R.D.R., *Composite Materials : Engineering and Science*. 1st ed. 1994: Chapman & Hall.
9. Bhushan, B., *Nanotribology and Nanomechanics : Nanotribology, Biomimetics and Industrial Applications*. Vol. 2. 2011: Springer.
10. A. Ravikiran, S.J., *Effect of contact pressure and load on wear of alumina*. *Wear*, 2001. **251**: p. 980–984.
11. Deng Jianxin, C.T., Ding Zeliang, Liu Jianhua, Sun Junlong, Zhao Jinlong, *Tribological behaviors of hot-pressed Al₂O₃/TiC ceramic composites with the additions of CaF₂ solid lubricants*. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006. **26**: p. 1317–1323.
12. G.W. Stachowiak, A.W.B., *Chapter 4 Hydrodynamic Lubrication*, in *Engineering Tribology*. 2005, Elsevier Inc.
13. Dr. Chanchana Thanachayanont, M.N.K., Ms. Chabaiporn Junin, Mr. Kroekchai Inpor, Mr. Visittapong Yordsri, Ms. Pennapa Muthitamongkol, Mr. Suparoek Henpraserttae, *Microstructural and Mechanical Property Characterization of AlTiC wafers*. 2012: Western Digital (Thailand) Co., Ltd. p. 11-45.

14. Ching-Shan Lin, Y.-L.Y., Shun-Tian Lin, *Performances of metal-bond diamond tools in grinding alumina*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. **201**: p. 612–617.
15. G.W. Stachowiak, A.W.B., *Chapter 11 Abrasive, Erosive and Cavitation Wear*, in *Engineering Tribology*. 2005, Elsevier Inc.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ผ.1 ขนาดของเม็ดเพชรที่วัดจากภาพถ่ายผิวหน้าใบตัดด้วย SEM ในโหมด back scatter electron

วัดค่าครั้งที่	ขนาดของเม็ดเพชร (μm)	
	ก่อนเปิดคมเม็ดเพชร	หลังเปิดคมเม็ดเพชร
1	7.052	6.524
2	5.756	6.475
3	5.797	5.684
4	6.240	6.266
5	5.609	7.246
6	4.875	6.359
7	7.162	7.402
8	5.293	6.292
9	6.805	6.561
10	7.313	6.542
ค่าน้อยที่สุด	4.875	5.684
ค่าเฉลี่ย	6.190	6.535
ค่ามากที่สุด	7.313	7.402
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.853	0.489

หมายเหตุ: ทำการวัดค่าด้วยโปรแกรม ImageJ รุ่น 1.46r

ตารางที่ ฃ.2 ค่าทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแต่ละสภาวะการทดสอบ

สภาวะทดสอบการสึกหรอ		ตลอดการทดสอบ				หลังจาก 500 เมตร				
ความเร็วเคลื่อน เชิงเส้น (เมตร/วินาที)	แรงกดที่ให้ (นิวตัน)	ระยะทางไกล (เมตร)	ค่าน้อย ที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามาก ที่สุด	ค่าเบี่ยง เบน มาตรฐาน	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามาก ที่สุด	ค่าเบี่ยง เบน มาตรฐาน
0.2	10	1000	0.000	0.331	0.482	0.047	0.238	0.320	0.432	0.033
0.2	10	3000	0.000	0.354	0.517	0.050	0.200	0.322	0.448	0.037
0.2	10	5000	0.000	0.341	0.544	0.056	0.178	0.347	0.428	0.038
0.2	15	1000	-0.003	0.292	0.455	0.050	0.182	0.225	0.345	0.021
0.2	15	3000	-0.004	0.258	0.423	0.029	0.128	0.233	0.413	0.020
0.2	15	5000	-0.008	0.215	0.445	0.023	0.162	0.215	0.433	0.021
0.2	20	1000	-0.002	0.303	0.469	0.044	0.257	0.306	0.445	0.022
0.2	20	3000	-0.003	0.321	0.497	0.034	0.262	0.322	0.497	0.028
0.2	20	5000	-0.005	0.242	0.487	0.026	0.201	0.241	0.487	0.022
0.3	10	1000	0.000	0.264	0.447	0.040	0.206	0.254	0.364	0.022
0.3	10	3000	0.000	0.254	0.425	0.029	0.196	0.254	0.409	0.022

0.3	10	5000	0.000	0.270	0.375	0.027	0.209	0.274	0.354	0.022
0.3	15	1000	0.000	0.246	0.465	0.046	0.161	0.207	0.328	0.023
0.3	15	3000	0.000	0.273	0.463	0.041	0.163	0.218	0.302	0.021
0.3	15	5000	0.000	0.228	0.513	0.029	0.142	0.183	0.260	0.019
0.3	20	1000	0.000	0.260	0.476	0.042	0.209	0.257	0.401	0.021
0.3	20	3000	0.000	0.294	0.503	0.032	0.236	0.293	0.399	0.022
0.3	20	5000	0.000	0.249	0.563	0.028	0.188	0.246	0.415	0.020
0.4	10	1000	0.000	0.244	0.447	0.036	0.183	0.226	0.319	0.021
0.4	10	3000	0.000	0.259	0.447	0.029	0.156	0.229	0.349	0.022
0.4	10	5000	0.000	0.238	0.470	0.027	0.148	0.235	0.431	0.022
0.4	15	1000	0.000	0.190	0.445	0.046	0.153	0.186	0.342	0.023
0.4	15	3000	0.000	0.199	0.431	0.033	0.153	0.196	0.368	0.024
0.4	15	5000	0.000	0.154	0.457	0.025	0.121	0.151	0.317	0.017
0.4	20	1000	0.000	0.218	0.472	0.048	0.150	0.217	0.334	0.033
0.4	20	3000	0.000	0.234	0.474	0.037	0.162	0.233	0.386	0.024
0.4	20	5000	0.000	0.174	0.531	0.028	0.130	0.170	0.385	0.017

ตารางที่ ผ.3 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มจากแผนภูมิค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรูปที่ 4.10

ความเร็วไหลเชิงเส้น (เมตร/วินาที)	ผ่าน 1000 เมตร		ผ่าน 3000 เมตร		ผ่าน 5000 เมตร	
	10-15 นิวตัน	15-20 นิวตัน	10-15 นิวตัน	15-20 นิวตัน	10-15 นิวตัน	15-20 นิวตัน
0.2	-0.0190	0.0162	-0.0177	0.0177	-0.0263	0.0053
0.3	-0.0094	0.0099	-0.0072	0.0149	-0.0181	0.0126
0.4	-0.0078	0.0061	-0.0065	0.0073	-0.0168	0.0037

ตารางที่ ผ.4 ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานภายหลังจากทดสอบการสึกกร่อนแล้ว

ความเร็วไหลเชิงเส้น (เมตร/วินาที)	สภาวะทดสอบการสึกกร่อน		มวลของชิ้นงานที่ตรวจวัดได้		มวลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังทดสอบการสึกกร่อน	
	แรงกดที่ให้ (นิวตัน)	ระยะทางไหลที่ผ่านไป (เมตร)	ก่อนทดสอบการสึกกร่อน	หลังทดสอบการสึกกร่อน	แต่ละครั้ง	ค่าเฉลี่ย
0.2	10	1000	3.2054	3.2056	0.0001	0.0001
		3000	33.2526	33.2505	-0.0021	-0.0021
		5000	33.2822	33.2791	-0.0032	-0.0016

			3.1977	3.1975	-0.0001	
	1000	3.1107	3.1109	0.0001	0.0001	
		3.1972	3.1973	0.0001		
15	3000	3.1637	3.1640	0.0003	0.0001	
		3.1076	3.1075	-0.0001		
	5000	33.2398	33.2408	0.0010	0.0010	
	1000	3.2224	3.2225	0.0001	0.0001	
20	3000	3.1332	3.1333	0.0002	0.0002	
	5000	33.1833	33.1831	-0.0002	-0.0002	
	1000	3.2401	3.2405	0.0004	0.0004	
	3000	33.2372	33.2375	0.0003	0.0003	
10		3.1924	3.1928	0.0004		
	5000	33.2322	33.2324	0.0001	0.0001	
0.3						
	1000	3.2053	3.2053	0.0000	0.0000	
		3.2058	3.2057	-0.0001		
15	3000	3.1673	3.1673	0.0000	0.0001	

				3.1859	3.1862	0.0003	
	5000	33.2210	33.2203	3.2427	3.2429	-0.0007	-0.0003
	1000	3.1348	3.1348			0.0000	0.0000
20	3000	3.1784	3.1786			0.0002	0.0002
	5000	33.2259	33.2256			-0.0004	-0.0004
	1000	3.2145	3.2146			0.0001	0.0001
10	3000	33.2024	33.2027			0.0003	0.0002
	5000	3.1620	3.1621			0.0001	
		33.2873	33.2868			-0.0005	-0.0005
	1000	3.1903	3.1905			0.0002	0.0002
15	3000	3.1867	3.1865			-0.0002	-0.0001
	5000	3.2290	3.2290			0.0000	
		33.2292	33.2271			-0.0021	-0.0021
	1000	3.2065	3.2066			0.0001	0.0001
20	3000	3.1310	3.1311			0.0001	0.0001
	5000	33.2561	33.2566			0.0005	0.0005
0.4							

ตารางที่ ผ.5 ค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงไป, ปริมาตรการสึกหรอ และอัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานดีสก์ภายใต้สภาวะทดสอบการสึกหรอ

ความเร็วโกลเซิงเส้น (เมตร/วินาที)	สภาวะทดสอบการสึกหรอ		มวลที่เปลี่ยนแปลงไปของ ชิ้นงานดีสก์ (กรัม)	ปริมาตรการสึกหรอ (mm ³)	อัตราการสึกหรอจำเพาะ $k \times 10^{-6}$ (mm ³ /Nm)
	แรงกดที่ให้ (นิติน)	ระยะทางโกลที่ผ่านไป (เมตร)			
0.2	10	1000	0.0221	5.1878	518.7793
		3000	0.0376	8.8341	294.4705
		5000	0.0402	9.4444	188.8889
	15	1000	0.0254	5.9624	397.4961
		3000	0.0397	9.3114	206.9205
		5000	0.0544	12.7778	170.3704
0.3	20	1000	0.0375	8.8028	440.1408
		3000	0.0515	12.0814	201.3563
		5000	0.0598	14.0297	140.2973
	10	1000	0.0203	4.7653	476.5258
		3000	0.0306	7.1753	239.1758
		5000	0.0354	8.3020	166.0407
15	1000	0.0288	6.7684	451.2259	

			3000	0.0361	8.4624	188.0543			
			5000	0.0372	8.7324	116.4319			
	20		1000	0.0302	7.0970	354.8513			
			3000	0.0416	9.7731	162.8847			
			5000	0.0517	12.1362	121.3615			
	10		1000	0.0189	4.4366	443.6620			
			3000	0.0253	5.9311	197.7047			
			5000	0.0319	7.4883	149.7653			
			1000	0.0253	5.9390	395.9311			
			3000	0.0279	6.5415	145.3660			
	15		5000	0.0352	8.2551	110.0678			
			1000	0.0294	6.9092	345.4617			
			3000	0.0394	9.2567	154.2775			
	20		5000	0.0427	10.0313	100.3130			
		0.4							

ตารางที่ ๘.๖ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของแผ่นอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ก่อนทดสอบการสึกหรอ

ชิ้นงาน ดีส์ก์	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่วัดค่าได้, R_a (μm)					R_a (nm)	
	$R_{a,1}$	$R_{a,2}$	$R_{a,3}$	$R_{a,4}$	$R_{a,5}$	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P3-1_	0.01768	0.02320	0.02201	0.02159	0.02229	21.35	1.91
P3-1x	0.01973	0.02178	0.01848	0.01851	0.02092	19.88	1.31
P3-2_	0.02038	0.01849	0.02189	0.01842	0.01938	19.71	1.30
P3-2x	0.02137	0.02137	0.02085	0.01884	0.01877	20.24	1.19
P3-3_	0.01975	0.01947	0.01963	0.01935	0.01888	19.42	0.30
P3-3x	0.02076	0.02072	0.01936	0.02003	0.02014	20.20	0.51
P4-1x	0.01707	0.01648	0.01987	0.01845	0.01762	17.90	1.18
P4-2x	0.02050	0.01987	0.02006	0.01837	0.01936	19.63	0.73
P4-3x	0.01954	0.01713	0.01820	0.01765	0.01780	18.06	0.81

ตารางที่ ๗.7 ความหนาผิวเฉลี่ยของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานฟัน

ความเร็วโกล (m/s)	สภาวะทดสอบการสึกหรอ		ความหนาผิวเฉลี่ยที่วัดได้, R_a (μm)						R_a (nm)	
	แรงกดที่ให้ (N)	ระยะทางโกล (m)	$R_{a,1}$	$R_{a,2}$	$R_{a,3}$	$R_{a,4}$	$R_{a,5}$	$R_{a,6}$	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.2	10	1000	0.01058	0.01037	0.01127	0.01128	0.01098	0.01158	11.01	0.42
0.2	10	3000	0.01760	0.01631	0.01708	0.01615	0.01682	0.01528	16.54	0.74
0.2	10	5000	0.01313	0.01301	0.01289	0.01270	0.01290	0.01225	12.81	0.28
0.2	15	1000	0.01259	0.01195	0.01355	0.01280	0.01368	0.01364	13.04	0.64
0.2	15	3000	0.01275	0.01285	0.01321	0.01337	0.01388	0.01319	13.21	0.37
0.2	15	5000	0.01238	0.01241	0.01178	0.01288	0.01252	0.01321	12.53	0.44
0.2	20	1000	0.01362	0.01368	0.01365	0.01280	0.01319	0.01347	13.40	0.32
0.2	20	3000	0.01223	0.01239	0.01268	0.01099	0.01204	0.01135	11.95	0.59
0.2	20	5000	0.01313	0.01426	0.01503	0.01320	0.01409	0.01404	13.96	0.65
0.3	10	1000	0.01502	0.01636	0.01572	0.01474	0.01487	0.01623	15.49	0.65
0.3	10	3000	0.01252	0.01265	0.01136	0.01261	0.01302	0.01368	12.64	0.69
0.3	10	5000	0.01772	0.01676	0.01801	0.01817	0.01834	0.01724	17.71	0.55
0.3	15	1000	0.01122	0.01104	0.01061	0.01102	0.01104	0.01097	10.98	0.18

0.3	15	3000	0.01530	0.01519	0.01479	0.01506	0.01527	0.01566	15.21	0.26
0.3	15	5000	0.01379	0.01400	0.01396	0.01295	0.01401	0.01415	13.81	0.40
0.3	20	1000	0.01222	0.01196	0.01152	0.01228	0.01214	0.01220	12.05	0.26
0.3	20	3000	0.01154	0.01056	0.01346	0.01264	0.01636	0.01795	13.75	2.61
0.3	20	5000	0.01393	0.01516	0.01601	0.01551	0.01536	0.01474	15.12	0.65
0.4	10	1000	0.01547	0.01629	0.01678	0.01633	0.01705	0.01622	16.36	0.49
0.4	10	3000	0.01141	0.01110	0.01155	0.01206	0.01153	0.01262	11.71	0.50
0.4	10	5000	0.01679	0.01680	0.01791	0.01565	0.01576	0.01776	16.78	0.87
0.4	15	1000	0.01248	0.01278	0.01322	0.01305	0.01316	0.01191	12.77	0.46
0.4	15	3000	0.01334	0.01365	0.01394	0.01647	0.01510	0.01772	15.04	1.59
0.4	15	5000	0.01241	0.01265	0.01213	0.01214	0.01221	0.01307	12.44	0.34
0.4	20	1000	0.01291	0.01323	0.01206	0.01275	0.01250	0.01257	12.67	0.36
0.4	20	3000	0.01278	0.01394	0.01303	0.01347	0.01527	0.01457	13.84	0.87
0.4	20	5000	0.01195	0.01223	0.01265	0.01222	0.01205	0.01288	12.33	0.33

ตารางที่ ๘.8 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานพิน

สภาวะทดสอบการสึกหรอ		ความหยาบผิวเฉลี่ยที่วัดได้, R_q (μm)						R_q (nm)	
ความเร็วไถ (m/s)	แรงกดที่ให้ (N)	ระยะทางไถ (m)	$R_{q,1}$	$R_{q,2}$	$R_{q,3}$	$R_{q,4}$	$R_{q,5}$	$R_{q,6}$	ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน
0.2	10	1000	0.01321	0.01303	0.01408	0.01402	0.01379	0.01443	13.76
0.2	10	3000	0.02154	0.02009	0.02099	0.01993	0.02040	0.01862	20.26
0.2	10	5000	0.01602	0.01618	0.01584	0.01544	0.01597	0.01516	15.77
0.2	15	1000	0.01554	0.01489	0.01717	0.01599	0.01714	0.01709	16.30
0.2	15	3000	0.01588	0.01588	0.01643	0.01653	0.01720	0.01650	16.40
0.2	15	5000	0.01532	0.01552	0.01451	0.01575	0.01533	0.01629	15.45
0.2	20	1000	0.01681	0.01679	0.01709	0.01613	0.01664	0.01693	16.73
0.2	20	3000	0.01528	0.01537	0.01575	0.01391	0.01494	0.01424	14.92
0.2	20	5000	0.01604	0.01745	0.01824	0.01620	0.01716	0.01714	17.04
0.3	10	1000	0.01820	0.01969	0.01920	0.01814	0.01786	0.01963	18.79
0.3	10	3000	0.01555	0.01552	0.01416	0.01566	0.01625	0.01653	15.61

0.3	10	5000	0.02188	0.02062	0.02167	0.02224	0.02209	0.02085	21.56	0.61
0.3	15	1000	0.01369	0.01359	0.01294	0.01356	0.01360	0.01366	13.51	0.26
0.3	15	3000	0.01893	0.01891	0.01830	0.01852	0.01900	0.01919	18.81	0.30
0.3	15	5000	0.01702	0.01713	0.01726	0.01607	0.01735	0.01763	17.08	0.49
0.3	20	1000	0.01515	0.01480	0.01411	0.01527	0.01487	0.01514	14.89	0.39
0.3	20	3000	0.01460	0.01341	0.01670	0.01572	0.01980	0.02167	16.98	2.89
0.3	20	5000	0.01693	0.01868	0.01932	0.01890	0.01919	0.01862	18.61	0.79
0.4	10	1000	0.01900	0.01981	0.02015	0.01973	0.02071	0.01948	19.81	0.53
0.4	10	3000	0.01432	0.01370	0.01432	0.01487	0.01437	0.01535	14.49	0.51
0.4	10	5000	0.02046	0.02052	0.02122	0.01948	0.01944	0.02115	20.38	0.71
0.4	15	1000	0.01522	0.01567	0.01601	0.01614	0.01607	0.01471	15.64	0.52
0.4	15	3000	0.01700	0.01708	0.01723	0.02021	0.01896	0.02185	18.72	1.82
0.4	15	5000	0.01512	0.01582	0.01517	0.01535	0.01553	0.01636	15.56	0.43
0.4	20	1000	0.01588	0.01648	0.01512	0.01583	0.01556	0.01569	15.76	0.41
0.4	20	3000	0.01561	0.01764	0.01620	0.01687	0.01873	0.01815	17.20	1.09
0.4	20	5000	0.01470	0.01496	0.01559	0.01512	0.01486	0.01561	15.14	0.35

ตารางที่ ๗.๙ ความหนาแน่นผิวเฉลี่ยสูงสุดของรอยการสึกหรอที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานพิน

สภาวะทดสอบการสึกหรอ		ความหนาแน่นผิวเฉลี่ยที่วัดได้, R_z (μm)						R_z (nm)		
ความเร็วโกลด์ (m/s)	แรงกดที่ให้ (N)	ระยะทางโกลด์ (m)	$R_{z,1}$	$R_{z,2}$	$R_{z,3}$	$R_{z,4}$	$R_{z,5}$	$R_{z,6}$	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.2	10	1000	0.04506	0.04505	0.04816	0.04831	0.04767	0.04939	47.27	1.65
0.2	10	3000	0.07036	0.06741	0.06906	0.06419	0.06689	0.06284	66.79	2.60
0.2	10	5000	0.05593	0.05640	0.05465	0.05360	0.05514	0.05223	54.66	1.41
0.2	15	1000	0.05231	0.05173	0.05856	0.05442	0.05765	0.05310	54.63	2.61
0.2	15	3000	0.05452	0.05414	0.05656	0.05567	0.05735	0.05621	55.74	1.12
0.2	15	5000	0.05174	0.05403	0.04994	0.05415	0.05239	0.05551	52.96	1.83
0.2	20	1000	0.05728	0.05710	0.05721	0.05611	0.05706	0.05723	57.00	0.40
0.2	20	3000	0.05211	0.05277	0.05374	0.04813	0.05005	0.04879	50.93	2.08
0.2	20	5000	0.05503	0.05887	0.06086	0.05554	0.05787	0.05842	57.77	1.99
0.3	10	1000	0.06091	0.06524	0.06469	0.06143	0.06116	0.06551	63.16	2.01
0.3	10	3000	0.05180	0.05244	0.04782	0.05185	0.05557	0.05582	52.55	2.68
0.3	10	5000	0.07265	0.06855	0.07392	0.07352	0.07332	0.06937	71.89	2.12
0.3	15	1000	0.04898	0.04963	0.04635	0.04861	0.04755	0.04822	48.22	1.05

0.3	15	3000	0.06267	0.06285	0.06039	0.06210	0.06388	0.06366	62.59	1.15
0.3	15	5000	0.06112	0.05923	0.05995	0.05625	0.06011	0.06186	59.75	1.78
0.3	20	1000	0.05324	0.05130	0.05044	0.05454	0.05135	0.05344	52.39	1.44
0.3	20	3000	0.05001	0.04736	0.05567	0.05398	0.06699	0.07180	57.64	8.84
0.3	20	5000	0.05824	0.06348	0.06629	0.06341	0.06270	0.06108	62.53	2.46
0.4	10	1000	0.06319	0.06607	0.06598	0.06616	0.06907	0.06498	65.91	1.75
0.4	10	3000	0.04875	0.04772	0.04981	0.05056	0.05004	0.05288	49.96	1.60
0.4	10	5000	0.06907	0.06973	0.07111	0.06503	0.06552	0.07048	68.49	2.36
0.4	15	1000	0.05352	0.05399	0.05580	0.05581	0.05516	0.05113	54.24	1.63
0.4	15	3000	0.05740	0.05797	0.05812	0.06764	0.06324	0.07142	62.63	5.36
0.4	15	5000	0.05215	0.05482	0.05164	0.05276	0.05126	0.05455	52.86	1.37
0.4	20	1000	0.05350	0.05557	0.05136	0.05473	0.05217	0.05334	53.45	1.42
0.4	20	3000	0.05334	0.05827	0.05467	0.05618	0.06154	0.06171	57.62	3.20
0.4	20	5000	0.05036	0.05154	0.05363	0.05174	0.05122	0.05237	51.81	1.01

ตารางที่ ผ.10 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการสึกหรอของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดิสก์ที่สภาวะการทดสอบการสึกหรอต่างๆ

ความเร็ว ไถล (m/s)	แรงกด ที่ให้ (N)	ระยะทาง ไถล (m)	ชิ้นงานดิสก์		ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่วัดค่าได้, R_a (μm)						R_a (nm)		ΔR_a
			เลขที่	R_a (μm)	$R_{a,1}$	$R_{a,2}$	$R_{a,3}$	$R_{a,4}$	$R_{a,5}$	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน		
0.2	10	1	P4-1x	17.89800	0.01859	0.01848	0.02034	0.02134	0.01691	19.13200	1.54859	1.23400	
0.2	10	3	P3-1_	21.35400	0.01851	0.02078	0.01990	0.02001	0.01963	19.76600	0.73508	-1.58800	
0.2	10	5	P3-1x	19.88400	0.01641	0.01726	0.01805	0.01859	0.01790	17.64200	0.74773	-2.24200	
0.2	15	1	P4-2x	19.63200	0.01992	0.01860	0.02016	0.01944	0.01897	19.41800	0.57843	-0.21400	
0.2	15	3	P3-2x	20.24000	0.02075	0.02201	0.02244	0.02107	0.02201	21.65600	0.63711	1.41600	
0.2	15	5	P3-2_	19.71200	0.01707	0.01915	0.01711	0.01915	0.01885	18.26600	0.96651	-1.44600	
0.2	20	1	P4-3x	18.06400	0.01959	0.01928	0.01918	0.01875	0.01787	18.93400	0.59607	0.87000	
0.2	20	3	P3-3x	20.20200	0.02096	0.01823	0.01879	0.01901	0.02053	19.50400	1.05352	-0.69800	
0.2	20	5	P3-3_	19.41600	0.01717	0.01708	0.01994	0.01716	0.01817	17.90400	1.09429	-1.51200	
0.3	10	1	P4-1x	17.89800	0.02112	0.02145	0.02108	0.02036	0.01949	20.70000	0.70185	2.80200	

0.3	10	3	P3-1_	21.35400	0.02217	0.01984	0.02100	0.01906	0.02178	20.77000	1.16808	-0.58400
0.3	10	5	P3-1x	19.88400	0.02054	0.01904	0.01764	0.01929	0.01967	19.23600	0.94629	-0.64800
0.3	15	1	P4-2x	19.63200	0.01825	0.01918	0.02029	0.02024	0.02051	19.69400	0.85657	0.06200
0.3	15	3	P3-2x	20.24000	0.02018	0.02431	0.02290	0.02406	0.02353	22.99600	1.48882	2.75600
0.3	15	5	P3-2_	19.71200	0.01997	0.02012	0.02019	0.02032	0.01957	20.03400	0.25804	0.32200
0.3	20	1	P4-3x	18.06400	0.02086	0.02184	0.02199	0.01950	0.02070	20.97800	0.89921	2.91400
0.3	20	3	P3-3x	20.20200	0.01938	0.01969	0.01890	0.02057	0.01863	19.43400	0.67683	-0.76800
0.3	20	5	P3-3_	19.41600	0.01860	0.01902	0.01762	0.01924	0.02161	19.21800	1.31885	-0.19800
0.4	10	1	P4-1x	17.89800	0.01877	0.02106	0.02041	0.02023	0.02153	20.40000	0.93791	2.50200
0.4	10	3	P3-1_	21.35400	0.02027	0.02159	0.02037	0.02147	0.02106	20.95200	0.54605	-0.40200
0.4	10	5	P3-1x	19.88400	0.02099	0.02028	0.02187	0.02183	0.02046	21.08600	0.66617	1.20200
0.4	15	1	P4-2x	19.63200	0.01928	0.02113	0.01979	0.01995	0.01835	19.70000	0.90713	0.06800
0.4	15	3	P3-2x	20.24000	0.01778	0.01855	0.01866	0.01866	0.01700	18.13000	0.65385	-2.11000
0.4	15	5	P3-2_	19.71200	0.01983	0.01851	0.01885	0.01769	0.02058	19.09200	1.01209	-0.62000
0.4	20	1	P4-3x	18.06400	0.01901	0.01963	0.01986	0.02059	0.02036	19.89000	0.55746	1.82600
0.4	20	3	P3-3x	20.20200	0.01984	0.01904	0.01917	0.01873	0.01888	19.13200	0.38374	-1.07000
0.4	20	5	P3-3_	19.41600	0.01844	0.01823	0.01843	0.01841	0.01848	18.39800	0.08704	-1.01800

ตารางที่ ผ.11 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการสึกหรอของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดีสก์ที่สภาวะการทดสอบ การสึกหรอต่างๆ

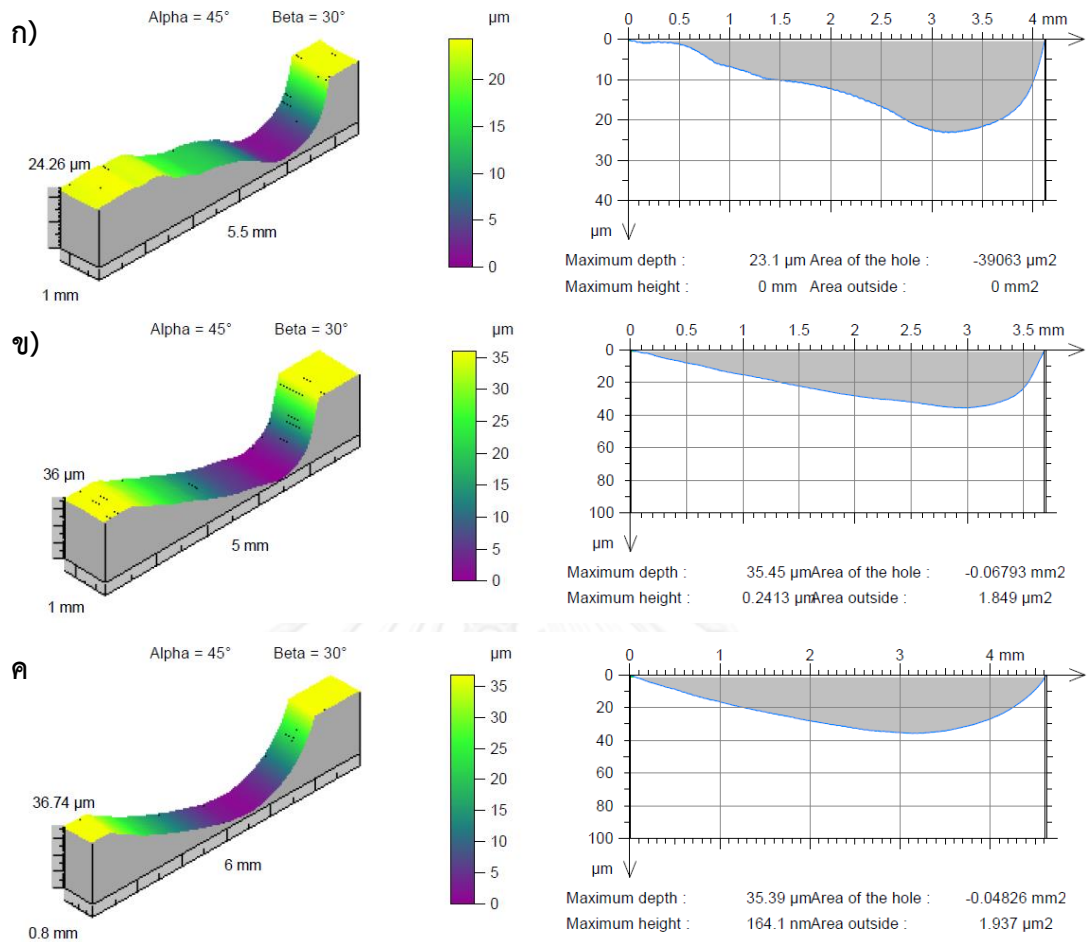
ความเร็ว ไถล (m/s)	แรงกดที่ ให้ (N)	ระยะทาง ไถล (km)	ชิ้นงานดีสก์		ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่วัดค่าได้, R_q (μm)						R_q (nm)		ΔR_q
			เลขที่	R_q (μm)	$R_{q,1}$	$R_{q,2}$	$R_{q,3}$	$R_{q,4}$	$R_{q,5}$	ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย		
0.2	10	1	P4-1x	22.90000	0.02362	0.02360	0.02564	0.02667	0.02147	24.20000	1.80686	1.30000	
0.2	10	3	P3-1_	27.10400	0.02366	0.02644	0.02548	0.02568	0.02500	25.25200	0.92136	-1.85200	
0.2	10	5	P3-1x	25.22200	0.02100	0.02193	0.02265	0.02302	0.02246	22.21200	0.70067	-3.01000	
0.2	15	1	P4-2x	24.94200	0.02561	0.02413	0.02568	0.02503	0.02420	24.93000	0.66450	-0.01200	
0.2	15	3	P3-2x	25.38600	0.02667	0.02777	0.02843	0.02711	0.02794	27.58400	0.62243	2.19800	
0.2	15	5	P3-2_	25.04200	0.02179	0.02395	0.02198	0.02422	0.02360	23.10800	1.01952	-1.93400	
0.2	20	1	P4-3x	23.02800	0.02492	0.02436	0.02475	0.02389	0.02309	24.20200	0.65950	1.17400	
0.2	20	3	P3-3x	25.57200	0.02660	0.02305	0.02365	0.02587	0.02587	25.00800	1.39273	-0.56400	
0.2	20	5	P3-3_	24.77600	0.02190	0.02158	0.02520	0.02191	0.02308	22.73400	1.33470	-2.04200	
0.3	10	1	P4-1x	22.90000	0.02702	0.02714	0.02709	0.02555	0.02497	26.35400	0.91268	3.45400	

0.3	10	3	P3-1_	27.10400	0.02913	0.02541	0.02662	0.02456	0.02821	26.78600	1.69695	-0.31800
0.3	10	5	P3-1x	25.22200	0.02587	0.02417	0.02297	0.02443	0.02495	24.47800	0.95202	-0.74400
0.3	15	1	P4-2x	24.94200	0.02317	0.02436	0.02590	0.02570	0.02596	25.01800	1.09348	0.07600
0.3	15	3	P3-2x	25.38600	0.02579	0.03087	0.02961	0.03047	0.02968	29.28400	1.81070	3.89800
0.3	15	5	P3-2_	25.04200	0.02589	0.02602	0.02589	0.02624	0.02536	25.88000	0.28976	0.83800
0.3	20	1	P4-3x	23.02800	0.02652	0.02784	0.02810	0.02539	0.02656	26.88200	0.98611	3.85400
0.3	20	3	P3-3x	25.57200	0.02427	0.02461	0.02390	0.02580	0.02354	24.42400	0.77559	-1.14800
0.3	20	5	P3-3_	24.77600	0.02397	0.02463	0.02259	0.02456	0.02697	24.54400	1.41709	-0.23200
0.4	10	1	P4-1x	22.90000	0.02393	0.02691	0.02607	0.02599	0.02722	26.02400	1.14922	3.12400
0.4	10	3	P3-1_	27.10400	0.02606	0.02793	0.02639	0.02719	0.02700	26.91400	0.65111	-0.19000
0.4	10	5	P3-1x	25.22200	0.02667	0.02583	0.02748	0.02769	0.02589	26.71200	0.77481	1.49000
0.4	15	1	P4-2x	24.94200	0.02462	0.02698	0.02568	0.02562	0.02356	25.29200	1.14533	0.35000
0.4	15	3	P3-2x	25.38600	0.02261	0.02319	0.02344	0.02360	0.02162	22.89200	0.71943	-2.49400
0.4	15	5	P3-2_	25.04200	0.02534	0.02371	0.02405	0.02311	0.02676	24.59400	1.30596	-0.44800
0.4	20	1	P4-3x	23.02800	0.02429	0.02508	0.02545	0.02591	0.02603	25.35200	0.62968	2.32400
0.4	20	3	P3-3x	25.57200	0.02508	0.02430	0.02401	0.02365	0.02385	24.17800	0.49861	-1.39400
0.4	20	5	P3-3_	24.77600	0.02366	0.02343	0.02341	0.02360	0.02350	23.52000	0.09654	-1.25600

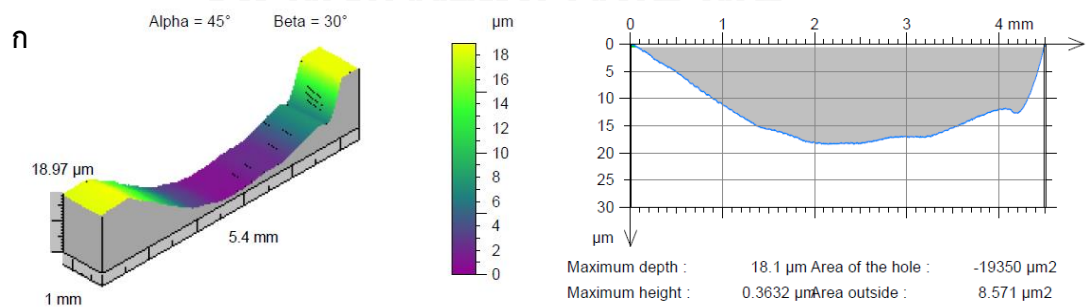
ตารางที่ ๗.12 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการทดสอบการสึกหรอของร่องการสึกหรอบนผิวหน้าชิ้นงานดิสก์ที่สถานะการทดสอบการสึกหรอต่างๆ

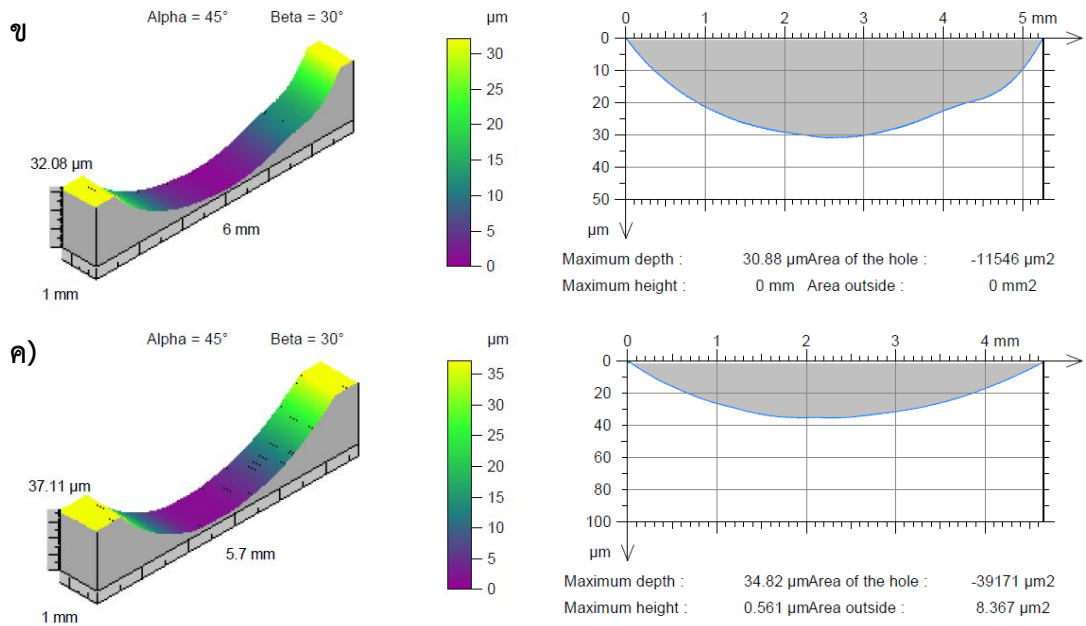
ความเร็ว ไถล (m/s)	แรงกด ที่ให้ (N)	ระยะทาง ไถล (m)	ชิ้นงานดิสก์		ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่วัดค่าได้, R_z (μm)						R_z (nm)		ΔR_z
			เลขที่	R_z (μm)	$R_{z,1}$	$R_{z,2}$	$R_{z,3}$	$R_{z,4}$	$R_{z,5}$	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน		
0.2	10	1	P4-1x	87.28400	0.08968	0.09064	0.09553	0.09947	0.08348	91.76000	5.43684	4.47600	
0.2	10	3	P3-1_	101.09200	0.08913	0.09800	0.09487	0.09709	0.09186	94.19000	3.29912	-6.90200	
0.2	10	5	P3-1x	95.30800	0.07923	0.08137	0.08491	0.08397	0.08391	82.67800	2.08655	-12.63000	
0.2	15	1	P4-2x	95.92000	0.09795	0.09527	0.09751	0.09676	0.09350	96.19800	1.62770	0.27800	
0.2	15	3	P3-2x	97.09400	0.10600	0.10840	0.11060	0.10720	0.10870	108.18000	1.54195	11.08600	
0.2	15	5	P3-2_	95.98800	0.08211	0.08904	0.08206	0.09174	0.08855	86.70000	3.92167	-9.28800	
0.2	20	1	P4-3x	87.64600	0.09430	0.09110	0.09446	0.09096	0.08899	91.96200	2.11121	4.31600	
0.2	20	3	P3-3x	97.95000	0.09717	0.08861	0.09097	0.09094	0.09826	93.19000	3.80822	-4.76000	
0.2	20	5	P3-3_	94.93600	0.08221	0.08197	0.09308	0.08325	0.08777	85.65600	4.26228	-9.28000	
0.3	10	1	P4-1x	87.28400	0.10200	0.10400	0.10150	0.09649	0.09718	100.23400	2.90684	12.95000	

0.3	10	3	P3-1_	101.09200	0.11520	0.09459	0.09664	0.09153	0.11460	102.51200	10.24644	1.42000
0.3	10	5	P3-1x	95.30800	0.09820	0.09274	0.08827	0.09287	0.09539	93.49400	3.28601	-1.81400
0.3	15	1	P4-2x	95.92000	0.08925	0.09201	0.09986	0.09917	0.09632	95.32200	4.10451	-0.59800
0.3	15	3	P3-2x	97.09400	0.09848	0.12250	0.11820	0.12010	0.11620	115.09600	8.56510	18.00200
0.3	15	5	P3-2_	95.98800	0.09894	0.09946	0.10230	0.10270	0.09986	100.65200	1.54203	4.66400
0.3	20	1	P4-3x	87.64600	0.10130	0.10720	0.10670	0.09807	0.10230	103.11400	3.43365	15.46800
0.3	20	3	P3-3x	97.95000	0.09105	0.09179	0.09023	0.09560	0.08925	91.58400	2.17884	-6.36600
0.3	20	5	P3-3_	94.93600	0.08887	0.09086	0.08536	0.09140	0.09926	91.15000	4.57474	-3.78600
0.4	10	1	P4-1x	87.28400	0.09150	0.09860	0.09782	0.09616	0.10350	97.51600	3.87574	10.23200
0.4	10	3	P3-1_	101.09200	0.10320	0.10880	0.09981	0.10790	0.10850	105.64200	3.55571	4.55000
0.4	10	5	P3-1x	95.30800	0.09905	0.09882	0.10400	0.10460	0.09928	101.15000	2.58305	5.84200
0.4	15	1	P4-2x	95.92000	0.09307	0.10160	0.09955	0.09701	0.09039	96.32400	4.11132	0.40400
0.4	15	3	P3-2x	97.09400	0.08617	0.08742	0.08978	0.09098	0.08416	87.70200	2.45095	-9.39200
0.4	15	5	P3-2_	95.98800	0.09900	0.08977	0.09244	0.08664	0.10630	94.83000	7.03337	-1.15800
0.4	20	1	P4-3x	87.64600	0.09470	0.09510	0.09586	0.09848	0.09890	96.60800	1.74538	8.96200
0.4	20	3	P3-3x	97.95000	0.09441	0.09084	0.09136	0.08822	0.08955	90.87600	2.07544	-7.07400
0.4	20	5	P3-3_	94.93600	0.08856	0.08971	0.08865	0.08927	0.08918	89.07400	0.42382	-5.86200

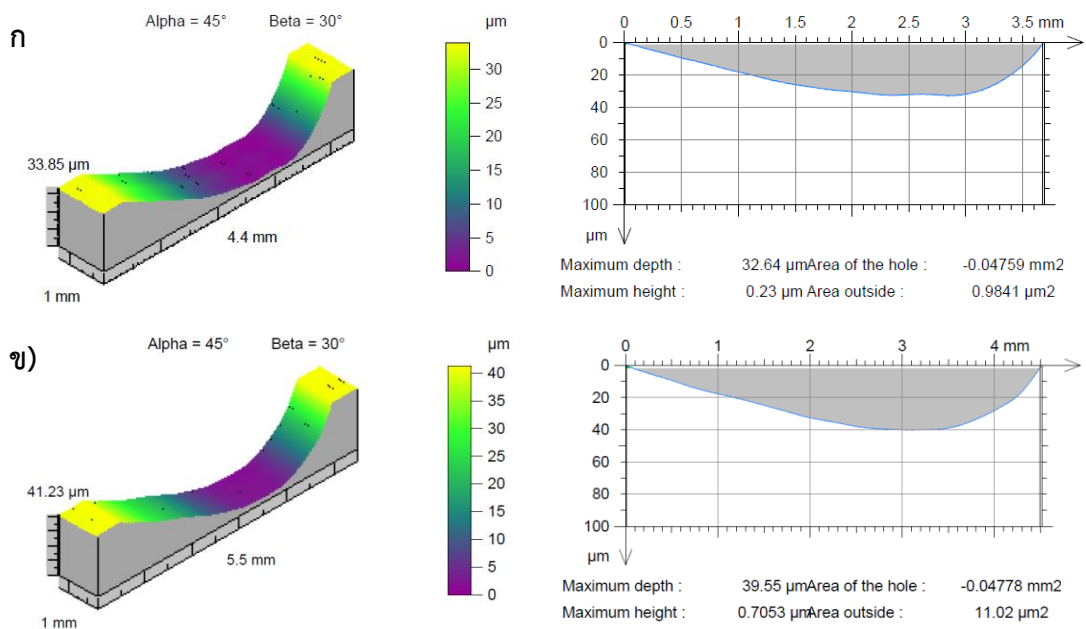


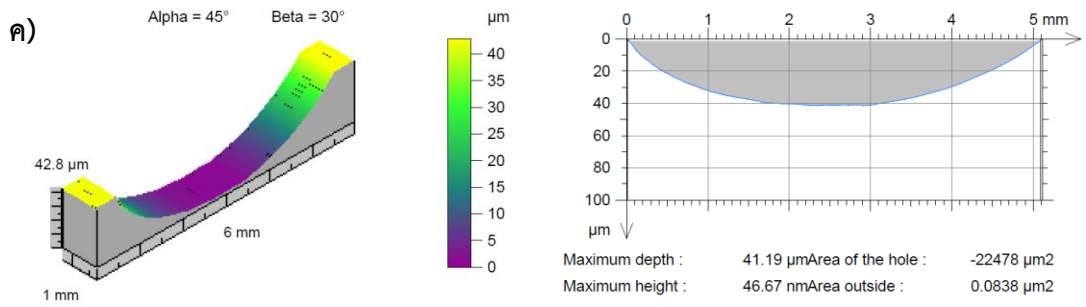
รูปที่ ผ.1 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร



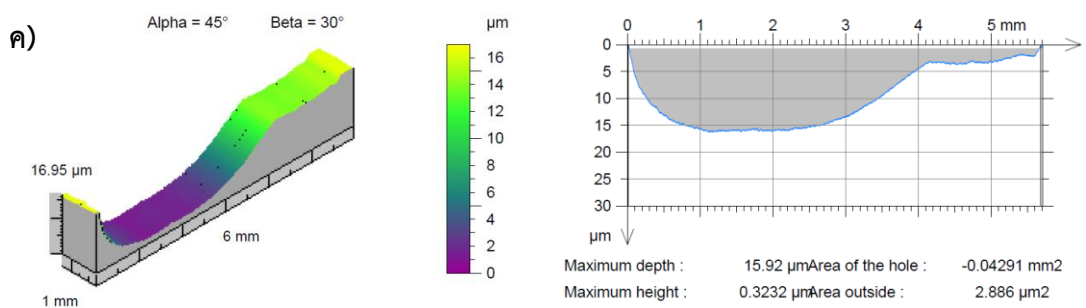
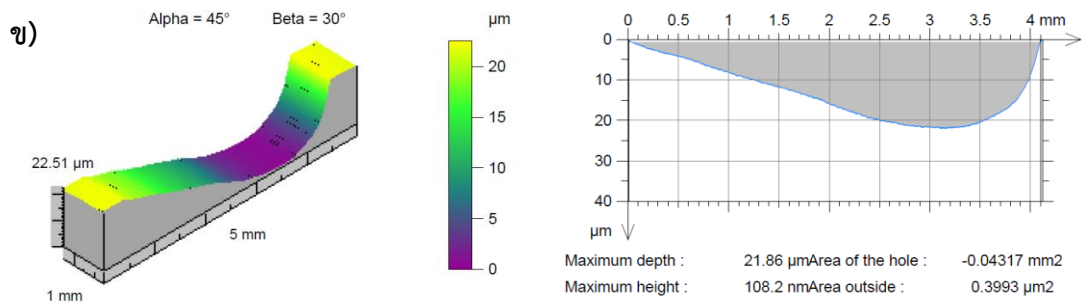
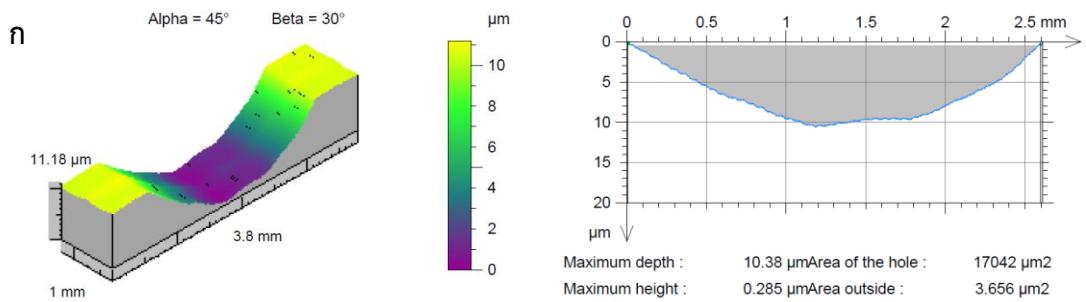


รูปที่ ผ.2 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

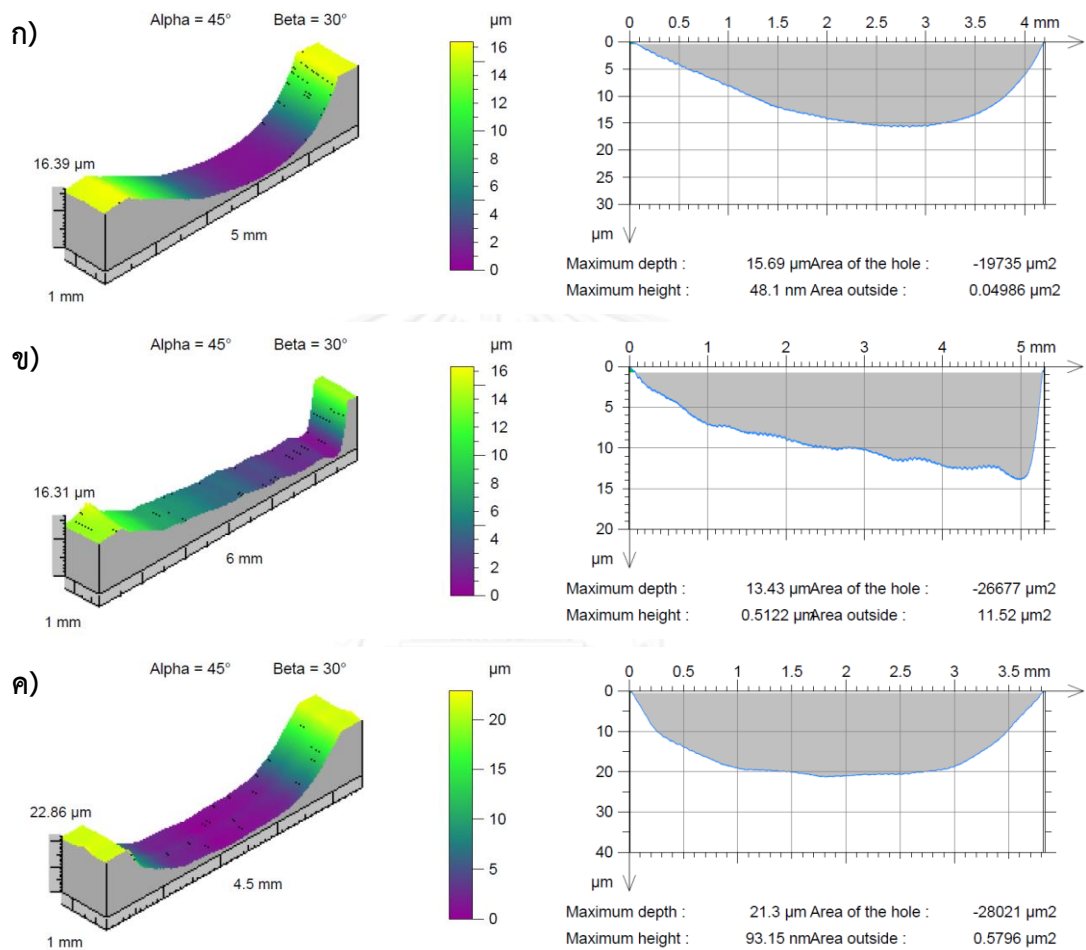




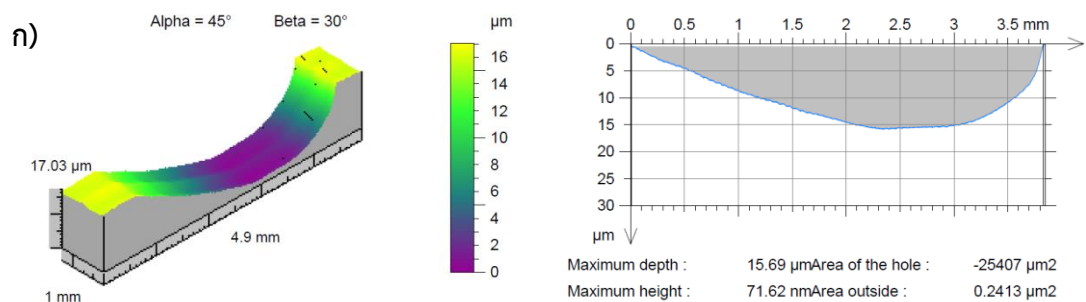
รูปที่ ผ.3 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

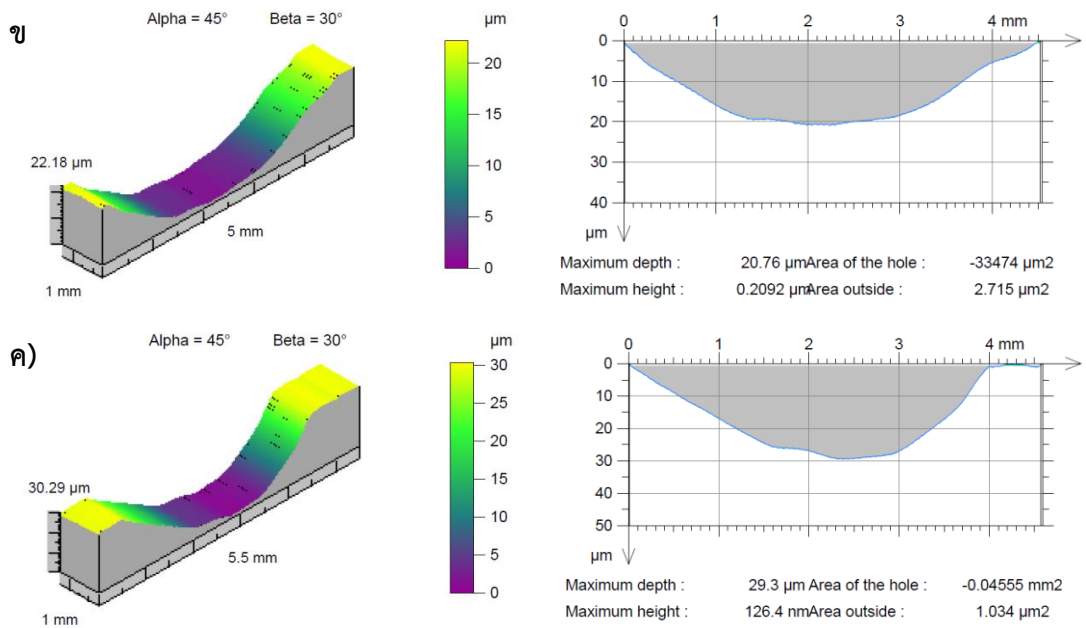


รูปที่ ๗.4 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไถเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไถ ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

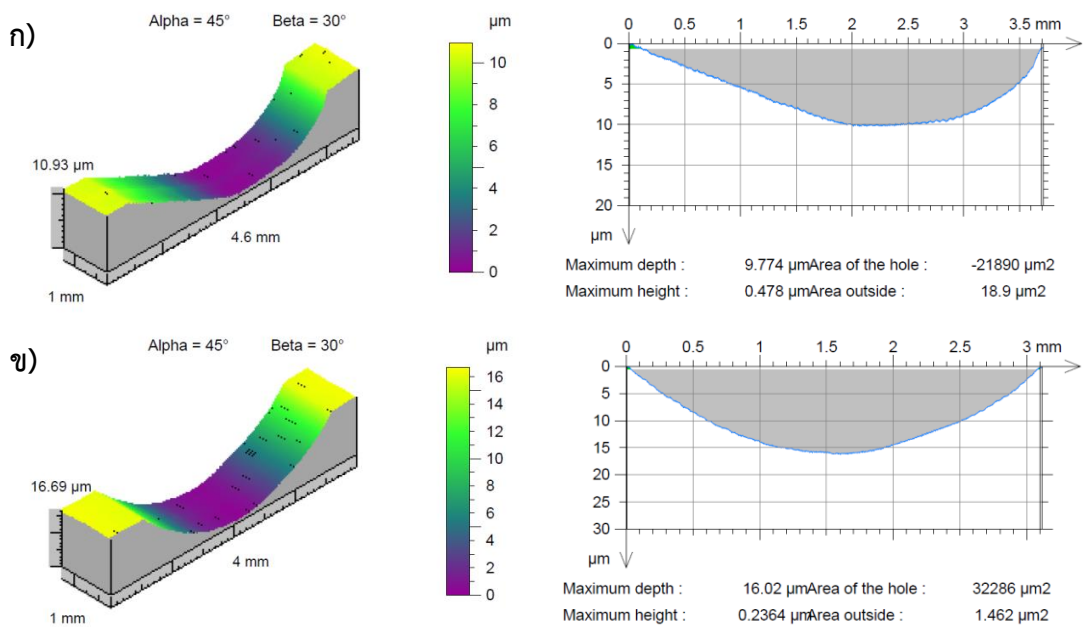


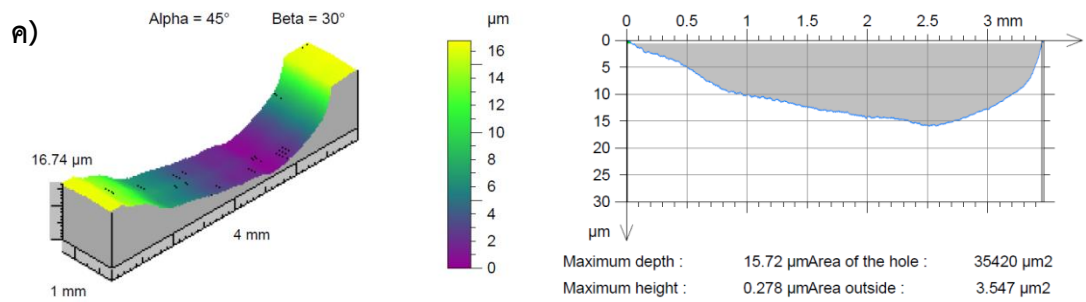
รูปที่ ๗.5 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไถเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไถ ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร



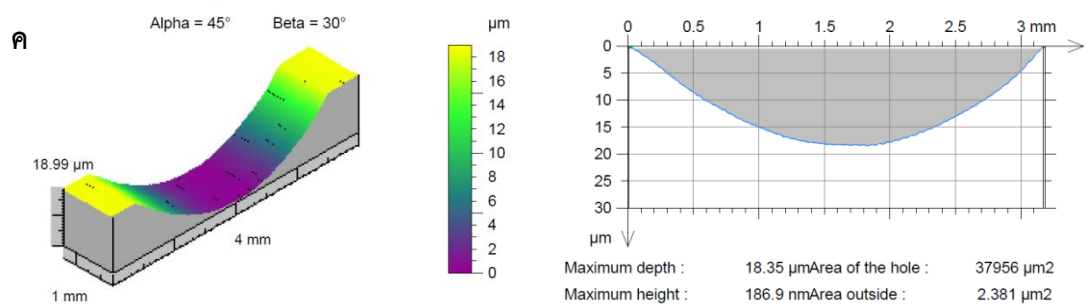
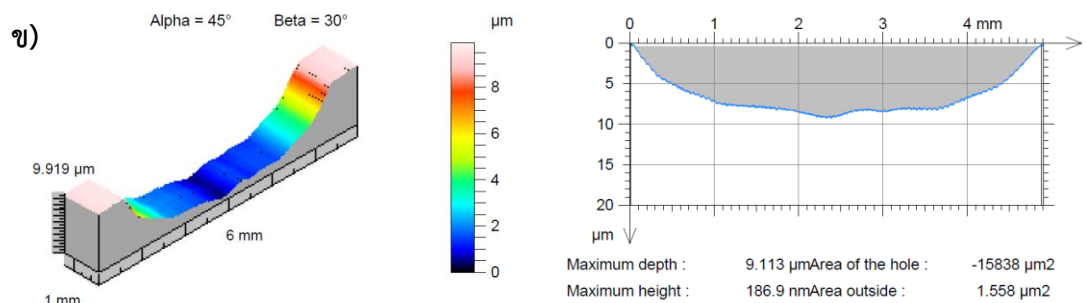
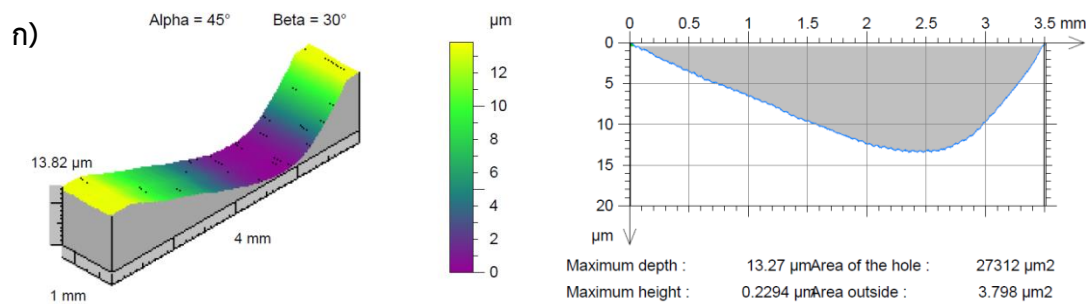


รูปที่ ผ.6 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดิสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

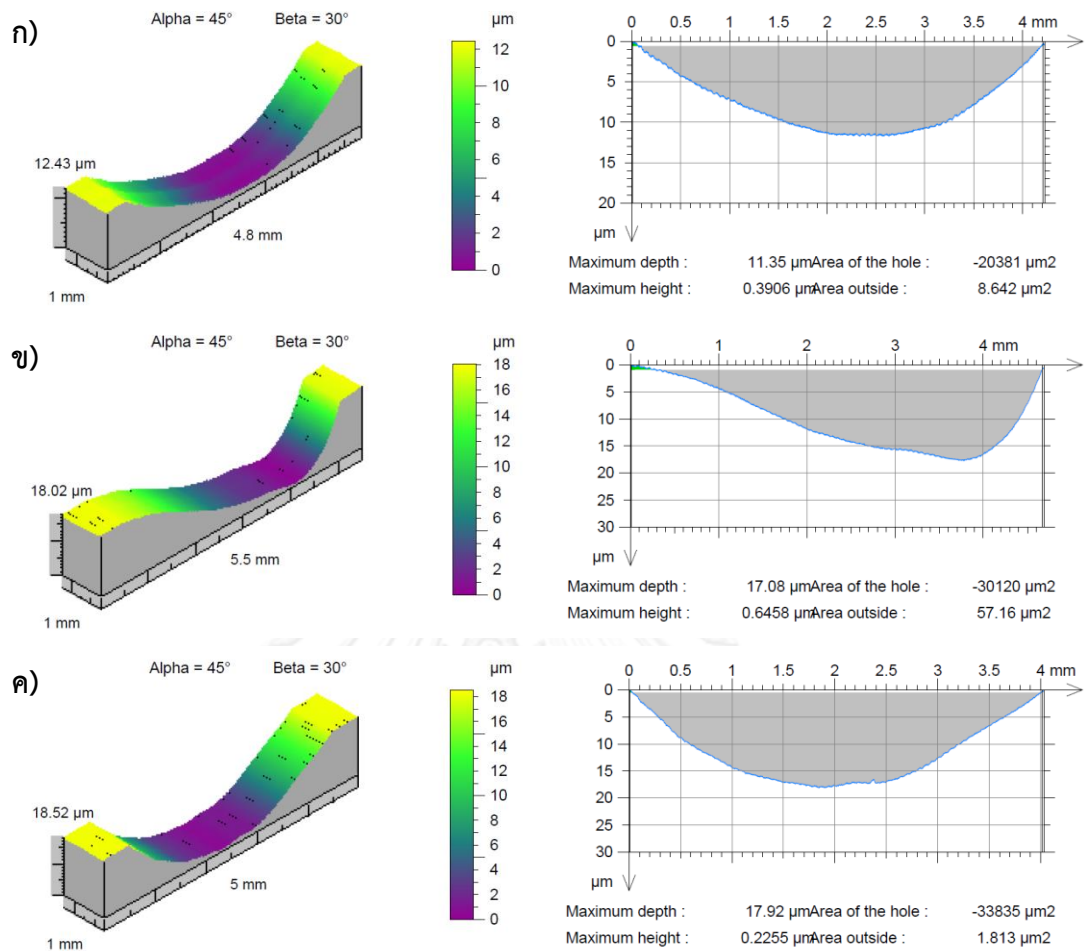




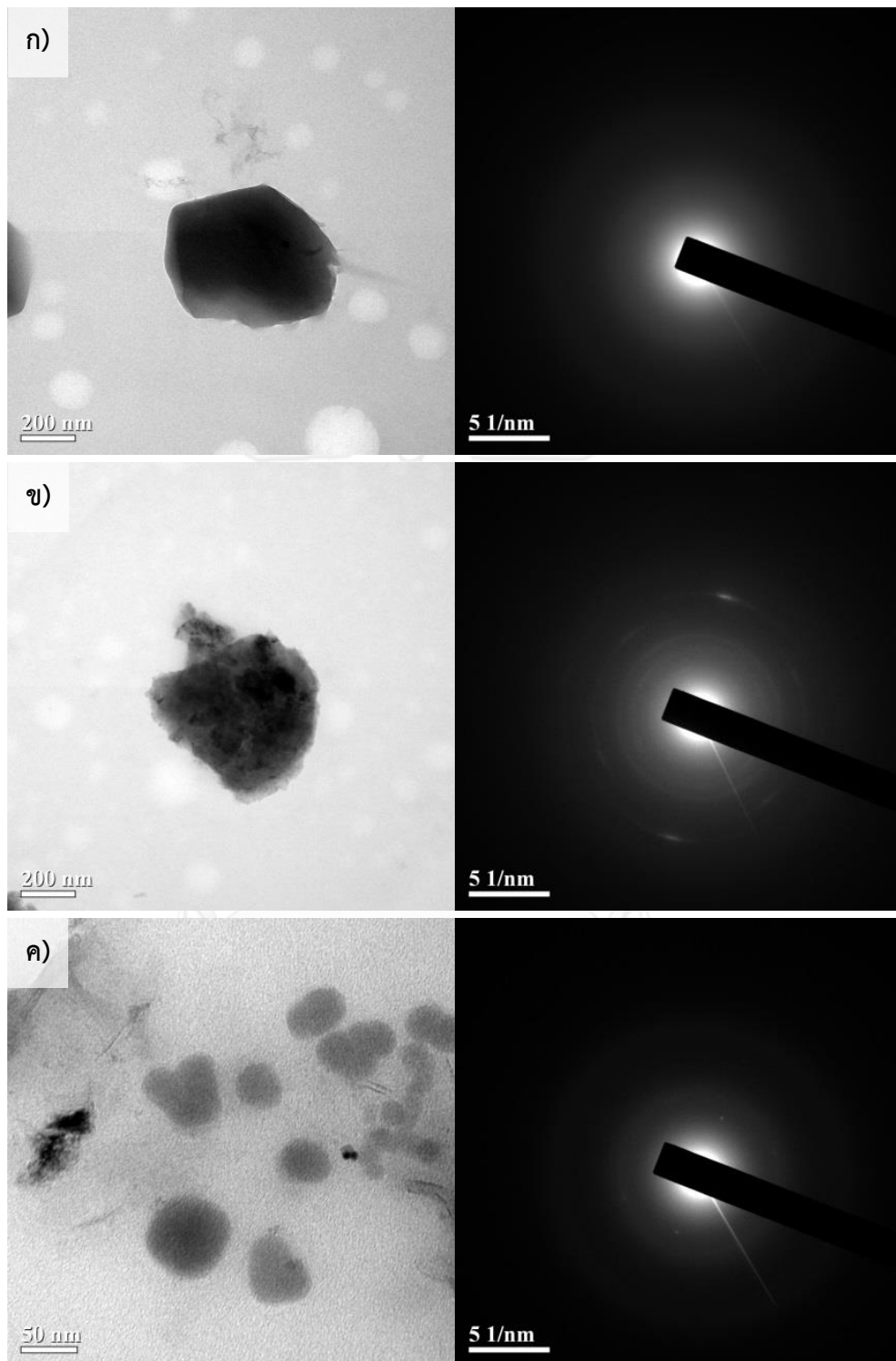
รูปที่ ๗.7 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดีสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร



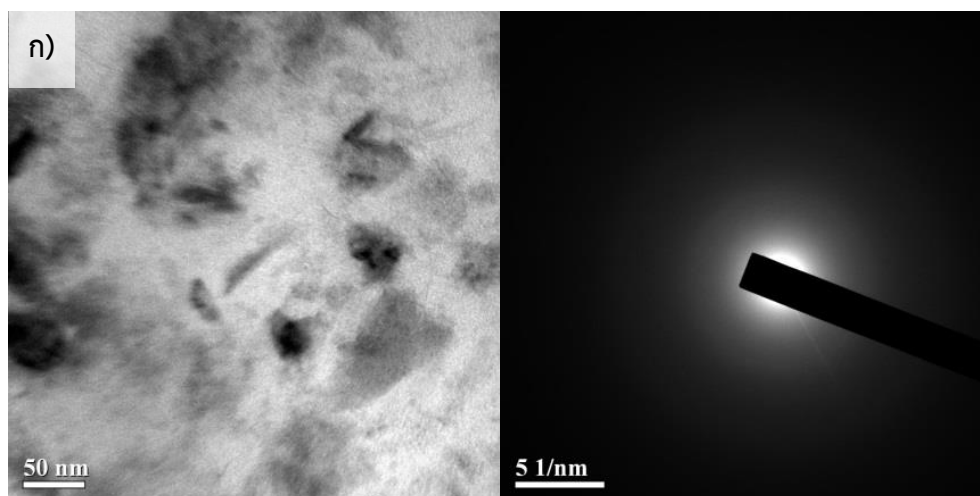
รูปที่ ๗.8 ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดีสก์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร



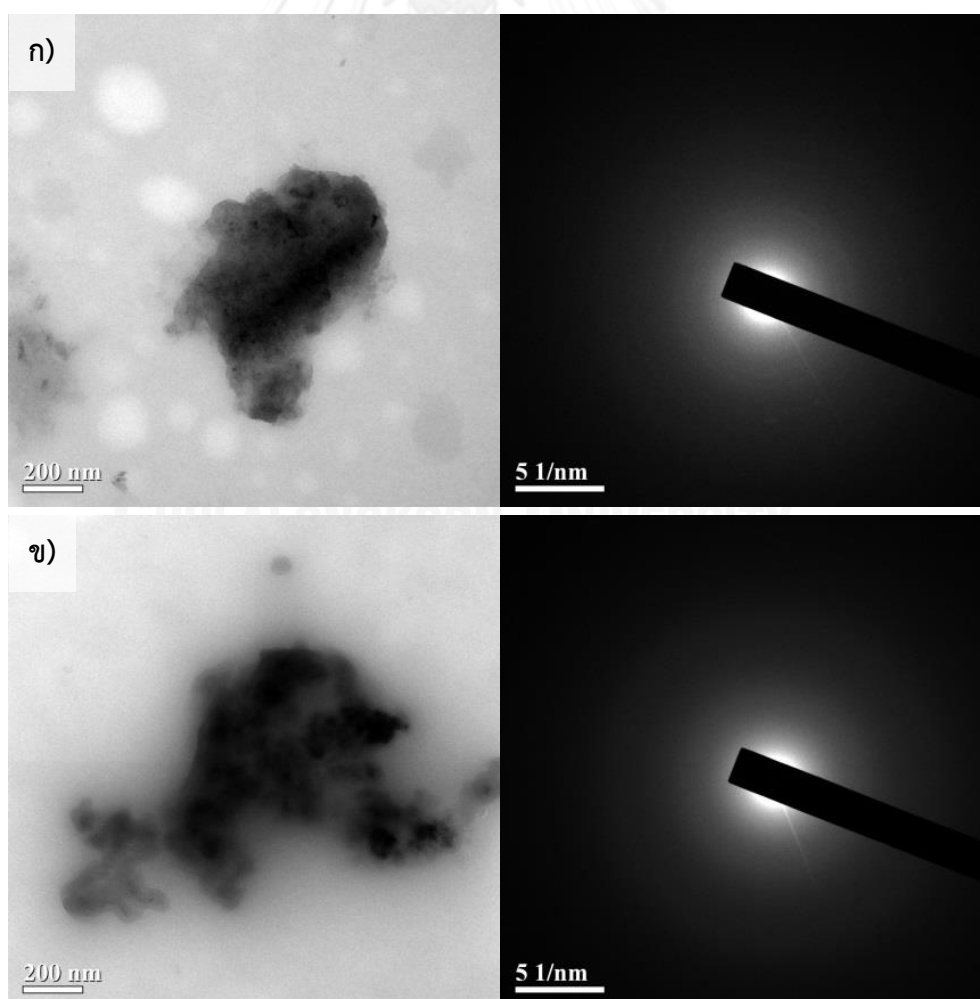
รูปที่ ๘.๙ ภาพร่องการสึกหรอในแบบ 3 มิติและ 2 มิติที่ผิวหน้าของชิ้นงานดีสค์หลังจากทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไถเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไถ ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

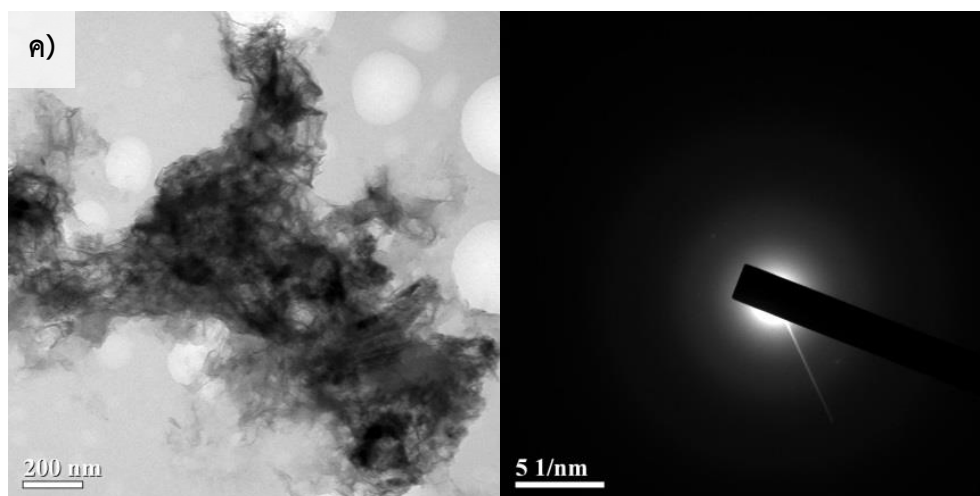


รูปที่ ๑๐ ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

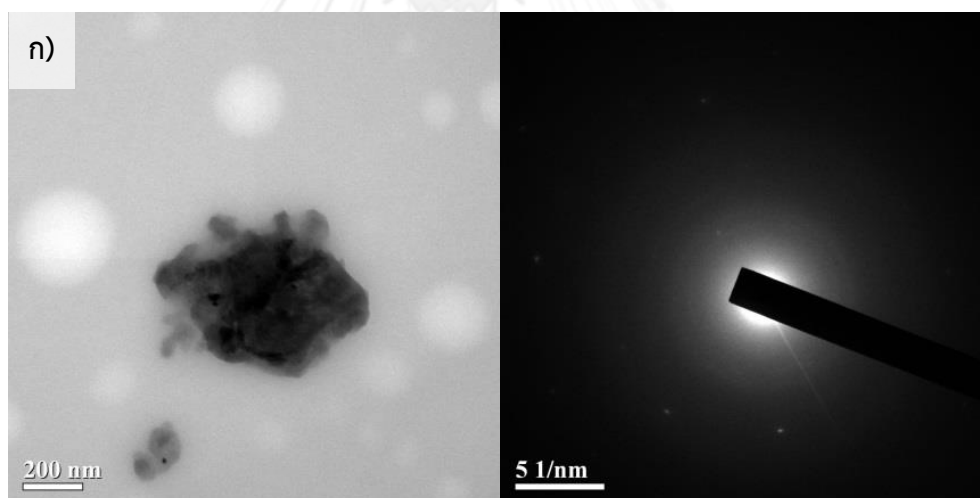


รูปที่ ผ.11 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบ การสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.2 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร

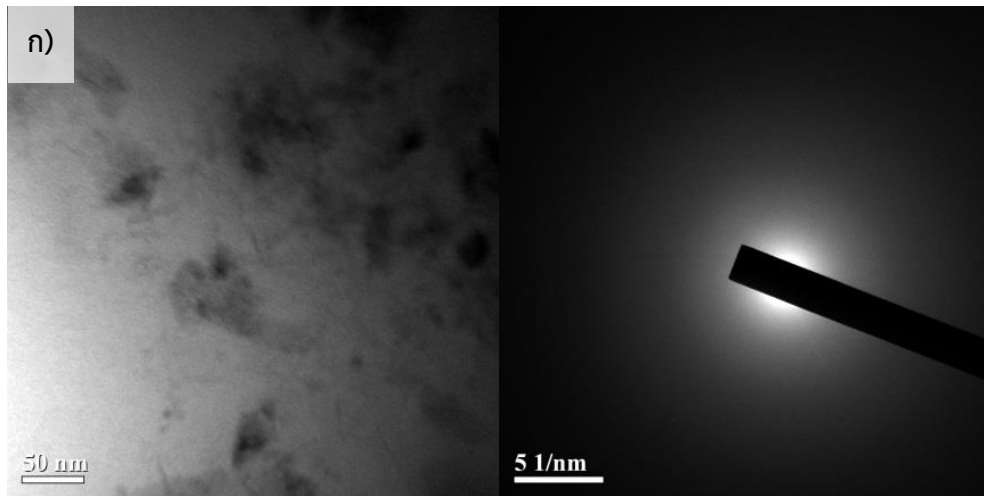




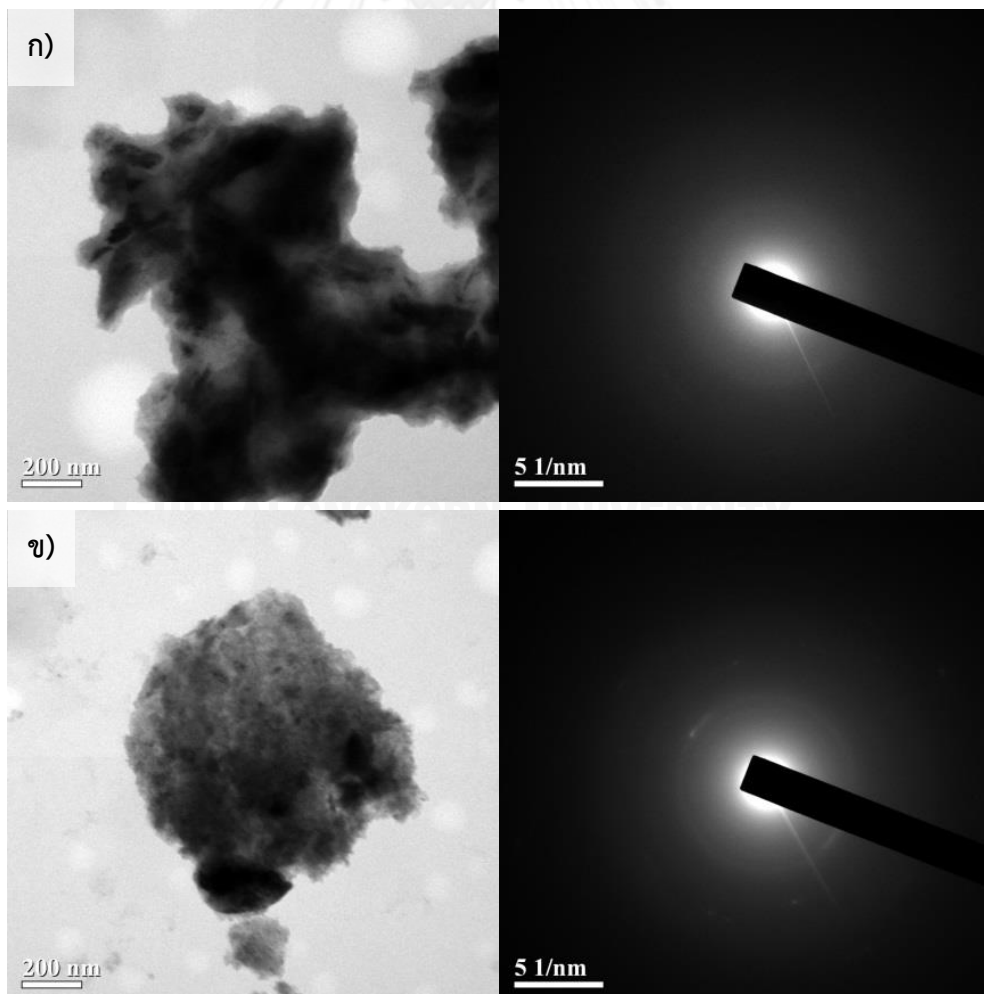
รูปที่ ๑๒. ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

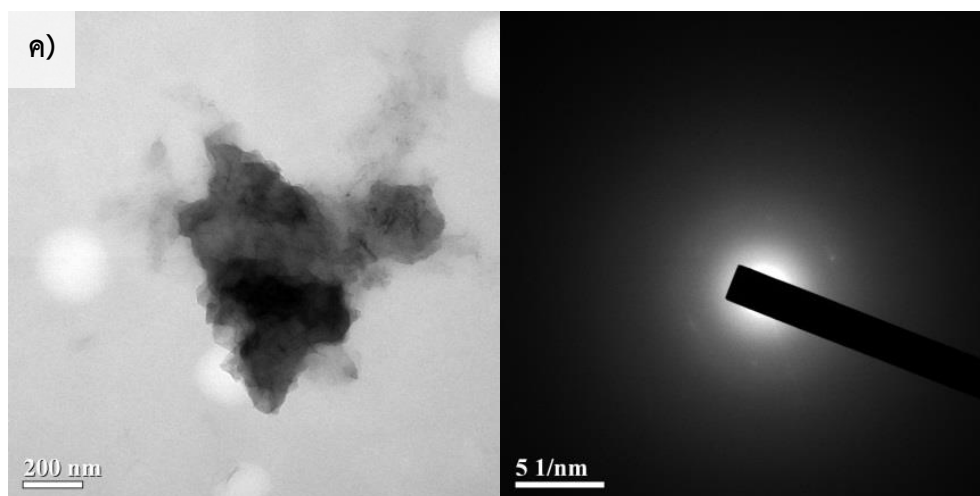


รูปที่ ๑๓. ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 15 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร

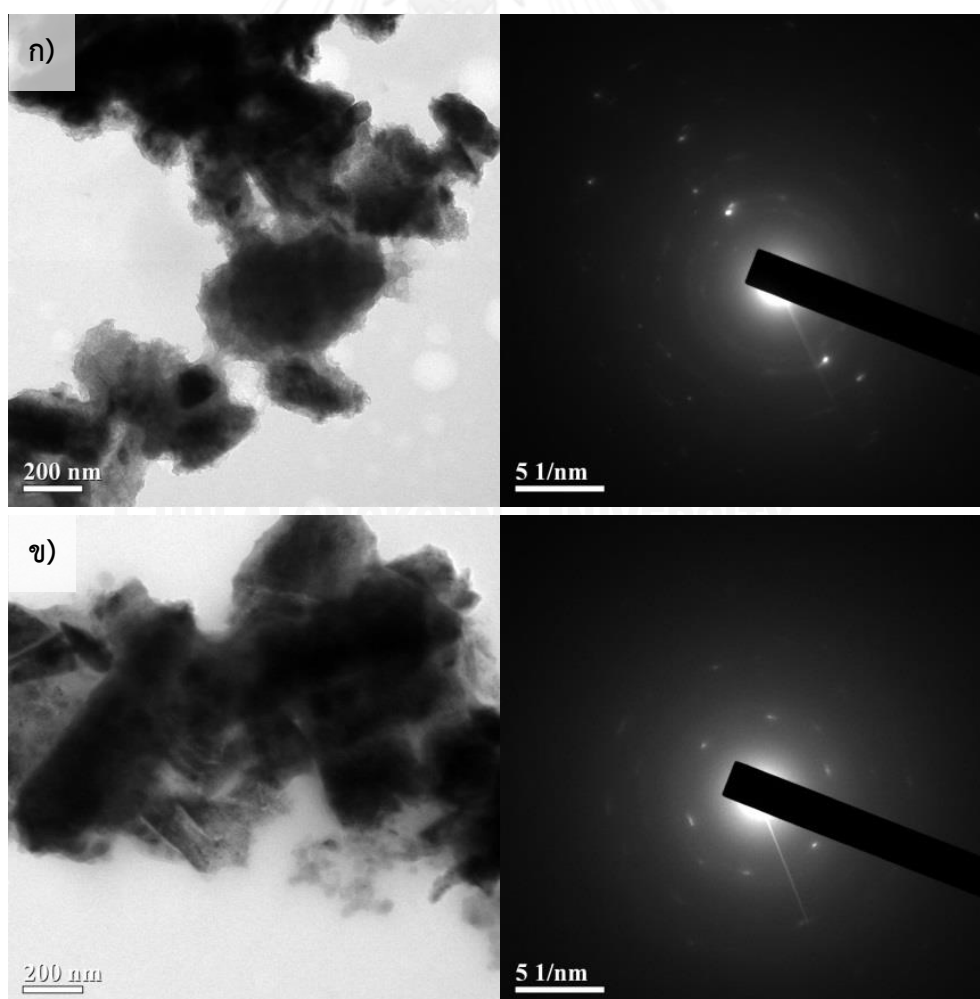


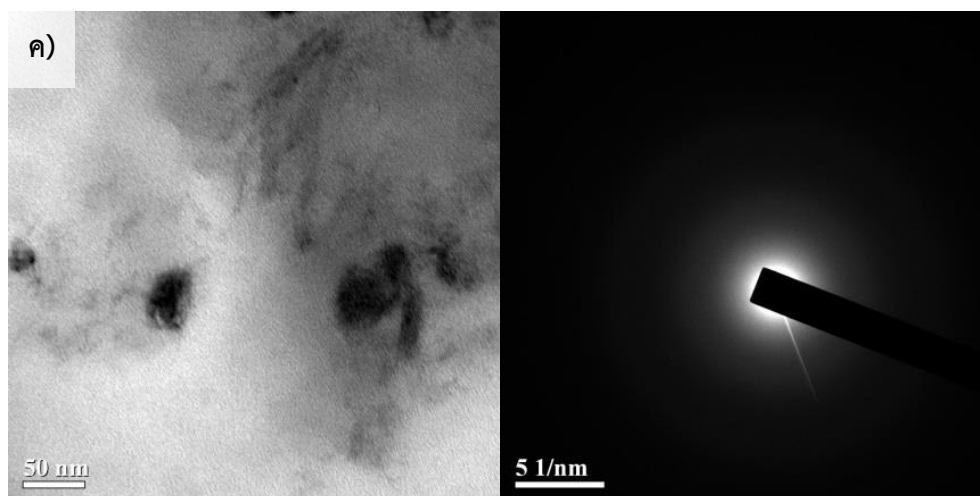
รูปที่ ผ.14 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบ การสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.3 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 5000 เมตร





รูปที่ ๑๕.15 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 10 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร





รูปที่ ๑.16 ภาพถ่ายจาก TEM และ electron diffraction pattern ของเศษวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วไกลเชิงเส้น 0.4 เมตรต่อวินาที แรงกดที่ให้ 20 นิวตัน และระยะทางไกล ก) 1000, ข) 3000 และ ค) 5000 เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล นายวิศรุต เฟ็งเลา
วัน - เดือน - ปีเกิด 2 มีนาคม 2531
ที่อยู่ 55/1 ม.2 ต.วังเย็น อ.บางแพ จ.ราชบุรี 70160
วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย
เบญจมราชูทิศราชบุรี ปีการศึกษา 2548
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
โทรศัพท์ติดต่อ 094-401-7222



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY